



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

SANNA TASKINEN
LÄMPÖMUOVATTUJEN POLYPROPEENITUOTTEIDEN
LAADUNVALVONNAN KEHITTÄMINEN

Diplomityö

Työn tarkastaja: Prof. Pentti Järvelä
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Auto-
maatio-, Kone- ja Materiaalitekniikan
tiedekunnan kokouksessa 6. huhtikuu-
ta 2011.

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

TASKINEN, SANNA: Lämpömuovattujen polypropeenituotteiden laadunvalvonnan kehittäminen

Diplomityö, 101 sivua +14 liitesivua

Kesäkuu 2011

Pääaine: Muovit ja elastomeerit

Tarkastaja: Prof. Pentti Järvelä

Avainsanat: Laatu, laadunvalvonta, konenäkö, lämpömuovaus, polypropeeni, kutistuma, muottikutistuma, jälkikutistuma,

Tämän diplomityön tavoitteena on löytää vaihtoehtoisia konenäköratkaisuja muovisten margariinirasian kansien dimensioiden mittaamiseen laadunvalvonnassa. Kansien ja rasioiden yhteensopivuuden kanssa on ollut satunnaisia ongelmia erityisesti tilanteessa, jossa rasiat valmistetaan toisella valmistajalla ja eri materiaalista. Tällaisessa tapauksessa polymeerimateriaaleille ominainen kutistumiskäyttäytyminen esimerkiksi lämpömuovausprosessin yhteydessä aiheuttaa erilaisia ongelmia esimerkiksi juuri kappaleiden yhteensopivuuden suhteen, kun kannessa ja rasiassa käytetyillä materiaaleilla on keskenään erilaiset kutistumisominaisuudet ja valmistusprosessin olosuhteet. Laadunvalvonnan kehittämisen tavoitteena onkin saada käyttöön järjestelmä, jolla kansien tärkeät mitat voitaisiin mitata tarkasti ja luotettavasti ja mittaustulosten avulla voitaisiin osoittaa kansien olevan oikean kokoisia, ja myös arvioida kansissa tapahtuvan kutistuman osuus tietyn ajan kuluttua.

Työ koostuu kolmesta osasta: teoria, kutistumistutkimus ja CASE-tutkimus. Teoriaosuudessa käsitellään ensin laatuun ja laadunvalvontaan liittyvää teoriaa, esimerkiksi laadunvalvontaprosessin vaiheita, keinoja ja tavoitteita. Konenäkötekniikkaan liittyvä teoria käsittelee konenäkösovellusten käyttöä erilaisissa laadunvalvontatehtävissä ja konenäkösystemin suunnitteluprojektiin liittyviä asioita. Teoriaosuuden viimeisessä osa-alueessa käsitellään kestämuovien lämpömuovausprosessin sekä siitä aiheutuvan kutistumiskäyttäytymisen teoriaa. Koska muovituotteiden kutistumisesta seuraa mittapysyvyyteen liittyvien ongelmien lisäksi usein myös muita ongelmia, kuten kappaleiden taipumista ja vääntyilyä, on kutistumiskäyttäytymisen teorian yhteydessä kerrottu myös keinoista, joilla muovituotteiden kutistumista voidaan ennakoida ja hallita.

Tutkimusosuudessa käydään läpi kansille tehty kutistumistutkimus ja siitä saadut tulokset. Tutkimuksessa mitattiin kansissa tapahtuvaa jälkikutistumaa neljän viikon ajan. Erityistä huomiota kiinnitettiin kansien lämpömuovauksessa käytettävän monipesämuotin pesäkohtaisiin eroihin kutistuman suhteen. Tutkimustulosten perusteella eri muottipesillä valmistetut kannet kutistuvat keskenään erilailla ja jo ennen jälkikutistumista oli kansissa havaittavissa pesäkohtaisia eroja mittojen suhteen.

CASE-tutkimuksessa esitellään kansien laadunvalvontaan tarvittavan konenäkösystemin ominaisuuksia ja vaatimuksia esimerkiksi tutkittavan kannen ominaisuuksien perusteella. CASE-tutkimuksen lopuksi esitellään erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja kansien laadunvalvontaan.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Materials engineering

TASKINEN, SANNA: Developing the Quality Control of Thermoformed Polypropylene Products

Master of Science Thesis, 101 pages + 14 appendix pages

June 2011

Major: Plastics and elastomers

Examiner: Prof. Pentti Järvelä

Keywords: Quality, Quality control, Machine vision, Thermoforming, Polypropylene, Shrinkage, mold shrinkage, post-shrinkage

The objective of this thesis is to find alternative machine vision solutions for measuring plastic lids of margarine containers in quality control process. There have been problems with the compatibility of the lids and containers, especially in situations where the containers are made by another manufacturer and when different materials have been used. In these kinds of situations the shrinkage properties, which are typical to polymer materials, may cause various problems with the compatibility of plastic parts. The objective of developing the quality control process of the lids is to find new machine vision system to measure the dimensions of the lids accurately and reliably. Based on the measurement results, the lids can be showed to be right sized after the manufacturing process. Also the dimensions after certain time and occurred shrinkage can be estimated.

The thesis consists of three parts: theory, shrinkage study and CASE-study. The theory part deals first with quality and quality control, for example the steps, methods and targets of the quality control process. Theory of the machine vision technology deals with applications of machine vision systems in various quality control tasks and design project of the machine vision system. Last part of theory deals with thermoforming process of thermoplastics and the shrinkage that occurs in plastic parts as a result of the process. The shrinkage causes various problems, for example lack of dimensional stability, bending and warpage of the products, and therefore there is also some theory regarding to methods for predicting and controlling the shrinkage.

Study part of this thesis handles the shrinkage study made for the lids. Post-shrinkage of the lids was measured during four weeks period. Attention was specially paid to the differences in the amount of shrinkage between mold cavities. Based on the results of the study, the lids from different mold cavities shrank differently and there were dimensional differences between the lids from different cavities already in the beginning of the measurements.

The CASE-study introduces the characteristics and requirements of the machine vision system needed for measuring the lids. Finally there are some alternative solutions for quality control of the lids.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin vastaamaan muovisia elintarvikepakkauksia valmistavan yrityksen laadunvalvonnan haasteisiin TTY:n tukisäätiön myöntämän apurahan rahoittamana. Työn kirjoitusprojekti on tapahtunut pääasiassa Tampereella ja työhön liittyvä kutistumistutkimus ja taustatietojen kartoittaminen suoritettiin Hämeenlinnassa kesän ja syksyn 2010 aikana. Diplomityön tekeminen oli mielenkiintoinen projekti, jonka aikana opin paljon uutta niin konenäöstä kuin muovimateriaalien kutistumiskäyttäytymisestäkin. Sain myös tärkeää lisätietoa muovituotteiden tuotantoprosessista ja laadunvalvonnasta.

Haluan osoittaa kiitokset työhön liittyvien taustatietojen antamisesta Jari Salolle ja muille mukana olleille. Erityiskiitokset osoitan Anssi Järviselle avusta mittausten suunnittelussa ja toteutuksessa. Työn ohjaajana ja tarkastajana toiminutta professori Pentti Järvelää haluan kiittää kärsivällisyydestä ja työn aikana saamistani ohjeista ja neuvoista. Lisäksi kiitän vielä perhettäni, ystäviäni sekä avopuolisoani Keijoa saamastani tuesta ja hyödyllisistä näkökulmista eri asioihin työn edetessä.

Tampereella 26.5.2011

Sanna Taskinen

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
2. Teoreettinen tausta	3
2.1. Laatu ja laadunvalvonta	3
2.1.1. Laatutoiminnan historia	3
2.1.2. Laatu – Käsite ja tehtävät	5
2.1.3. Laadunvalvonta (quality control)	7
2.1.3.1 Palautesilmukka	9
2.1.3.2 Valvontapyramidi	13
2.1.3.3 Laadunvalvonnan suunnittelu	14
2.1.3.4 Prosessin valvonnan vaiheet ja yhdenmukaisuus	14
2.2. Konenäkö laadunvalvonnan välineenä	17
2.2.1. Mitä konenäkö on?	17
2.2.2. Sovelluskohteita	18
2.2.3. Konenäkösysteemin toiminta	20
2.2.4. Konenäkösysteemin suunnittelun vaiheet ja peruskomponentit	21
2.2.4.1 Tehtävän erittely	21
2.2.4.2 Systeemin suunnittelu	23
2.2.4.3 Kustannukset	33
2.2.4.4 Systeemin toteuttaminen	33
2.2.5. Muovituotteiden mittaamisen haasteet	34
2.3. Muovituotteiden kutistumiskäyttäytyminen lämpömuovausprosessissa	35
2.3.1. Kestomuovit - polypropeeni	35
2.3.2. Lämpömuovaus ja ekstruusio	39
2.3.3. Kutistumiskäyttäytyminen lämpömuovausprosessissa	46
2.3.3.1 Kutistuman määritelmä	46
2.3.3.2 Kutistumiseen vaikuttavia tekijöitä lämpömuovausprosessissa	48
2.3.3.3 Differentiaalinen kutistuminen	53
2.3.3.4 Kutistuman ennustaminen ja hallinta	54
3. Tutkimus	61
3.1. Kutistumismittaus kansille	61
3.2. Mittauslaitteisto ja -ohjelma	63
3.3. Mittausten eteneminen	65
3.3.1. Dimensiomittaukset	65
3.3.2. Seinämänvahvuus ja massa	67
3.4. Mittaustulokset ja niiden käsittelyä	68
3.4.1. Kutistuma eri suunnissa	68
3.4.2. Kutistuman pesäkohtainen tarkastelu	70
3.4.3. Pesäkohtaiset aloitusmitat	74
3.4.4. Massat ja seinämänvahvuudet	75
4. CASE: Konenäkösysteemin suunnittelu kansien laadunvalvontaan	78
4.1. Tehtävän erittely	78
4.2. Perustiedot kannesta	81
4.3. Mittaustapahtuma - nopeus ja liike	84
4.4. Kameratekniikka ja optiikka	85
4.5. Valaistus ja kuvausgeometria	86
4.6. Mekaaninen suunnittelu	86
4.7. Ohjelmisto	87
4.8. Kustannukset ja projektin toteuttaminen	88

4.9. Erilaisten ratkaisuvaihtoehtojen esittely	88
5. Johtopäätökset.....	97
Lähteet.....	99
Liite 1: Kutistumismittausten tulokset	102
Liite 2: Kansien seinämävahvuudet ja massat	114

1. JOHDANTO

Tämän diplomityön tavoitteena on kehittää lämpömuovausprosessilla polypropeenista valmistettavien margariinirasian kansien laadunvalvontaa. Kansia valmistavan yrityksen kansituotannossa on satunnaisesti ollut ongelmana kansien epäsopivuus rasioiden kanssa. Kannet ovat joko liian isoja, jolloin ne pysyvät huonosti paikallaan, tai liian pieniä, jolloin ne ovat tiukkoja ja voivat rikkoutua esimerkiksi rasioita koneellisesti kansitettaessa syntyneiden jännitysten vaikutuksesta. Osaksi laadunvalvontaprosessia tarvitaankin tarkka ja luotettava keino kansien mittaamiseksi. Tässä työssä tällaisia keinoja etsitään erityisesti konenäkötekniikan alueelta.

Osasyynä kansien ja rasioiden epäsopivuuteen on muovituotteille ominainen kutistumiskäyttäytyminen. Ongelma korostuu erityisesti sellaisten kansien kohdalla, joiden vastaava rasia valmistetaan eri valmistajan toimesta käyttäen eri materiaalia. Tällöin kansi ja materiaali kutistuvat keskenään erilailla ja yhteensopivuutta on vaikea ennustaa. Esimerkiksi tilanteessa, jossa kansimateriaali on osakiteistä polypropeenaa ja rasia valmistetaan amorfisella polystyreenillä pinnoitetusta kartongista, on selvää, että kannen ja rasian kutistumiskäyttäytyminen on keskenään erilaista. Osakiteiset muovit kutistuvat yleisesti ottaen enemmän kuin amorfiset. Ideaalitilanteessa kansi ja rasia valmistetaan samasta materiaalista, samaan aikaan ja samasta raaka-aine-erästä, jolloin molempien kutistumisasteet ovat lähellä toisiaan. Kutistumiskäyttäytymiseen lämpömuovausprosessissa vaikuttavat muovattavan materiaalin lisäksi myös prosessiolosuhteet, kuten jäähdytysnopeus ja muottilämpötila. Muita erityisesti kansien laatuun liittyviä haasteita ovat esimerkiksi kansien vääntyily ja reunahelmojen leviäminen.

Kansien laadunvalvontaan tarvitaan menetelmä, jolla kansien sopivuuden kannalta tärkeät mitat voitaisiin mitata tarkasti ja luotettavasti. Toistaiseksi kansien laadunvalvonnassa ei ole käytössä kansia mittaavaa systeemiä, eivätkä laboratoriokäytössä olevan videomittalaitteen ominaisuudet riitä laadunvalvonnan tarpeisiin. Suuren tuotantomäärän vuoksi tarkoituksena ei ole mitata jokaista kantta erikseen, vaan kansista mitataan vain sovittuja eriä. Mittaustulosten avulla valvotaan kansien dimensioita valmistusprosessin jälkeen ja mahdollisesti myös arvioidaan niitä tietyn ajan kuluessa tapahtuvan kutistuman jälkeen. Sopiva ratkaisu kansien laadunvalvontaan uskotaan löytyvän konenäkötekniikan alueelta. Työssä tutustutaankin konenäön teoriaan ja esimerkiksi konenäkösystemin suunnittelun vaiheisiin.

Aluksi työssä kerrotaan laadusta ja laadunvalvonnasta käsitteinä ja niiden merkityksestä teollisuudessa, sekä kuvaillaan laadunvalvontaprosessin vaiheita ja menetelmiä. Seuraavassa luvussa kerrotaan konenäkötekniikasta ja sovelluksista, joissa konenäköä voidaan käyttää. Samalla tutustutaan myös konenäkösystemin suunnitteluprosessiin. Tämän jälkeen kerrotaan muovituotteiden kutistumiskäyttäytymisestä lämpömuovausprosessissa ja siihen vaikuttavista tekijöistä sekä materiaaliominaisuuksien että prosessiparametrien osalta. Myös kutistumiskäyttäytymisen ennakkoinnin ja hallinnan perusteisiin on tutustuttu. Työssä on käsitelty melko yleisesti kaikkia lämpömuovattavia muoveja, mutta erityistä huomiota on pyritty kiinnittämään juuri polypropeenin, josta esimerkiksi kannet on valmistettu.

Koska merkittävänä ongelmana kansien mittapysyvyyden, ja näin ollen myös sopivuuden, kannalta on kansimateriaalina käytettävän polypropeenin suuri jälkikutistuma, tehdään diplomityön puitteissa kansille kutistumistutkimus, jossa mitataan kansien jälkikutistumaa neljän viikon ajan. Tutkimuksessa kansia mitataan sovituin aikavälein, ja tulosten perusteella voidaan arvioida kansissa tapahtuvaa mittojen muutosta, eli kutistumista. Erityisesti kansien valmistuksessa käytettävän 10-pesäisen muotin pesäkohtaisiin eroihin tullaan kiinnittämään huomiota. Työn tutkimusosuudessa käydään läpi kansien kutistumismittaukset ja niiden tulokset yksityiskohtaisemmin.

Osana tutkimustyötä tulee olemaan erilaisten kansien laadunvalvontaan sopivien mittauslaitteistojen kartoittaminen. Työn viimeinen osuus onkin eräänlainen CASE-tutkimus, jossa käydään läpi kansien mittaamisen kannalta merkityksellisiä asioita, joiden perusteella sopiva konenäkösystemi voidaan suunnitella. CASE-tutkimus etenee vaiheittain, ja lopuksi esitellään erilaisia ratkaisuehdotuksia kansien mittaamiseen. Näitä ratkaisuehdotuksia on saatu eri konenäköyrityksiltä.

2. TEOREETTINEN TAUSTA

2.1. Laatu ja laadunvalvonta

2.1.1. Laatutoiminnan historia

Niin kauan, kun ihminen on tehnyt työtä ja valmistanut työkaluja, on ollut laatutoimintaa. Se on kehittynyt teollistumiskehityksen rinnalla täyttämään tuotannon ja vaihdannan tarpeita. Laatutoiminta onkin teollistumisen tuote ja sen synnyn ja kehityksen edellytys. Varhainen laatuajatus syntyi pyrkimyksestä hyvään toimintatapaan ja ammattiylpeyteen. Teollistumisen myötä laatutoiminnan merkitys on vaihdellut ja lopulta nykyajan laatutoiminta käsittää laaja-alaisena koko yrityksen liiketoiminnan, aina työntekijöistä johtoportaaseen asti. [Laatuakatemia, 2010.]

Metrijärjestelmän käyttöönotto mahdollisti yhtenäisyyteen perustuvan laatutoiminnan ja laadun vaihtelun tarkkailussa tarvittavissa mittaustekniikoissa tapahtui kehitystä. Massatuotannon aikakaudella laatu perustui spesifikaatioihin ja standardeihin ja merkitsi tuotannon yhdenmukaisuutta, virheettömyyttä sekä valmistettujen komponenttien yhteensopivuutta sovittujen toleranssien rajoissa. Tuolloin laadunvalvontaan kuului jokaisen tuotteen fyysisten ominaisuuksien mittaaminen ja hylättyjä tuotteita tuli merkittävästi. Aseteollisuus johti laadunvalvonnan kehittymistä, sillä aseteollisuudessa oli tarve suuriin sarjoihin ja yhdenmukaiseen tuotantoon. Tarjonnan lisääntyessä, vaurauden kasvaessa ja kansainvälisen kilpailun lisääntyessä kehittyi tilanne, jossa asiakas oli noussut keskeiseen asemaan. Ihmisten tarpeet olivat kehittyneet aiempaa yksilöllisimmiksi ja asiakas alkoi kuluttaa, valita ja muuttaa mieltään. Tuotevalikoima laajeni ja kysynnän täyttämiseksi valmistettiin pienempiä sarjoja. Siirryttiin hintakilpailusta tuote- ja valikoimakilpailuun, jolloin henkilöstön merkitys kasvoi ja tuotantoon käytetystä ajasta tuli merkittävä kilpailutekijä. [Laatuakatemia, 2010.]

Laadun kehittämisen kannalta massa- ja sarjatuotannon vaatimusspesifikaatioihin, tarkastukseen ja korjaukseen perustuvassa konseptissa oli paljon puutteita: kaikki osat oli tarkastettava, tarkastusosastojen vaatima henkilöstömäärä oli huomattava, syntyi valtavasti hukkaa, ja laatuksennukset saattoivat muodostaa jopa 20 - 40 % yrityksen liikevaihdosta. Huomattiin, että massatuotannossa kaikkia komponentteja ei ollut mahdollista tarkastaa yksittäin, ja ratkaisuksi kehitettiin tilastollinen prosessinohjaus, jossa tarkastukseen otetaan näyte-eriä, joiden ominaisuuksien tilastollisella tarkastelulla saatiin tietoa koko prosessista. Todennäköisyys- ja tilastoteorioiden myötä eksakti maailmankuva

murtui ja tilalle tuli suhteellinen todennäköisyyksiin perustuva maailmankuva ja laatuajattelua voitiin taas kehittää. [Laatuakatemia, 2010.]

Talouselämän ja kaupan kansainvälistymisestä seurasi tarve laatuasioiden yhtenäistämisestä, minkä seurauksena luotiin SI-järjestelmä. Standardien yhtenäistämiseksi perustettiin ISO (International Organisation of Standardization), jonka luoman standardijärjestelmän avulla voitiin lisätä laadunhallintaa, vähentää tarkastuskustannuksia ja luoda vapaalle kilpailulle vertailtavat ja yhtenäiset olosuhteet. [Laatuakatemia, 2010.]

Teollisuuden kehittymisen alkuaikoina laatu oli tarkastuslaatua, eli huomiota kiinnitettiin vain valmiiseen tuotteeseen ja sen odotustenmukaisuuteen. Myöhemmin huomio kohdistui myös valmistusprosessiin ja sen häiriöttömyyteen. Vaihtelua tuotteiden laadussa kyettiin kontrolloimaan valvonnalla, mutta sitä ei kyetty poistamaan kokonaan. Uusi laatukonsepti perustui ennaltaehkäisyyn, kun keksittiin, että vain pienelle osuudelle virheistä löytyy jokin erityinen syy; pääosa virheistä on systeemiperusteisia ja satunnaisia. Kaikkia vikoja ei siis kannattanut käsitellä yksilöllisinä, joten niihin pyrittiin vaikuttamaan vaikuttamalla ensisijaisesti systeemiin ja prosessiin. Laatuajattelu laajeni voimakkaasti, ja pian siihen sisältyikin kokonaisvaltaisen laadunvalvonta, laatukustannukset, luotettavuustekniikka ja nollavirheajattelu. Kokonaisvaltaisen laatujohtamisen malli oli syntynyt. Laatujohtamisessa korostettiin yrityksen ylimmän johdon vastuuta tuotannon tehokkuudesta, ja apuna toimi tarkka mittausjärjestelmä ja laatukustannusten raportointi. Laadunvalvonnan demokratisoimisen seurauksena laadun tarkastaminen siirrettiin insinööreiltä ja valvojilta työntekijöiden vastuulle ja laadun kehittäminen käynnistyi organisaation kaikilla tasoilla. Syntyi ajatus, jonka mukaan laatua voitiin parantaa uusien menetelmin ja organisaatiota kehittämällä, kustannusten kuitenkin nousematta samassa suhteessa. [Laatuakatemia, 2010.]

Suomeen laatujohtaminen saapui 1980-luvun lopussa. Teollisuuden lisäksi laatujohtaminen käsittää nykyään myös palvelut ja niin yksityisen kuin julkisenkin sektorin toiminnan. Suomessa teollisuuden laatutoimintaa ohjailevat ISO 9000 -standardit. [Laatuakatemia, 2010.]

2000-luvulla on yritysten yhteiskuntavastuu korostunut ja osaksi laatutoimintaa ovat nousseet arvot. Laadun toiminta-alue on laajentunut koskettamaan myös raaka-aine-, energia- ja rahoituskysymyksiä ja lisäksi tuotteilta vaaditaan ympäristöystävällisyyttä, kuten esimerkiksi kierrätettävyyttä tai ekologista hävitettävyyttä. Nykyään, yksilöllisen ja joustavan tuotannon kaudella, laatu perustuu henkilöstön osaamiseen ja kehitysorganisaation oppimiseen. Lähtökohtana oppivalla organisaatiolla on henkilön toimiala- ja laatuosaamisen kehittäminen siten, että se kykenee tuottamaan virheettömiä tuotteita ja samalla kehittämään laatuosaamistaan jatkuvasti muuttuvien tarpeiden mukaisesti. Laadun toiminta-alue on laajentunut käsittämään koko liiketoimintaprosessin, huomioiden yhä enemmän myös toimittaja- ja kumppanuusverkostoa. [Laatuakatemia, 2010.]

2.1.2. Laatu – Käsite ja tehtävät

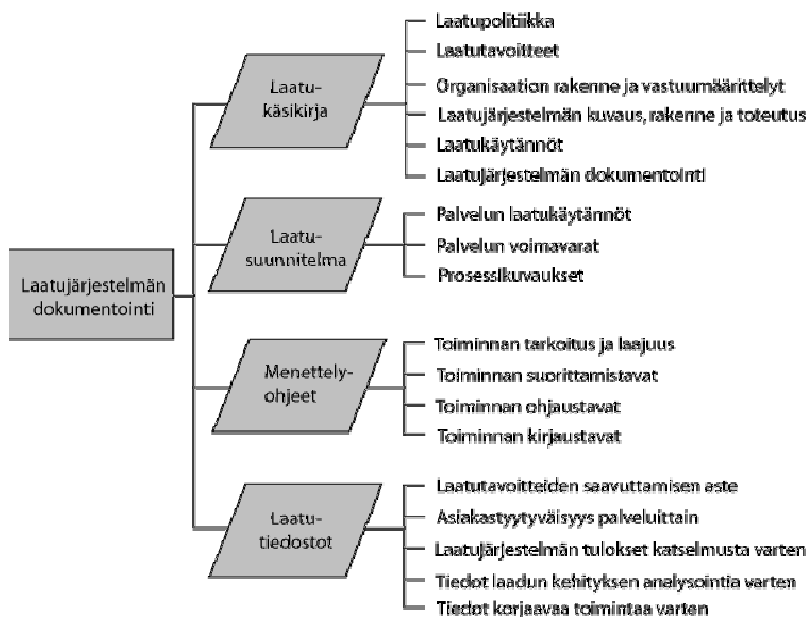
Laadun käsite on hyvin monimuotoinen ja sitä on lähes mahdoton määrittellä yksiselitteisesti. Laadun kuvaus riippuu nimittäin aina määrittäjän omista arvoista, kiinnostuksen kohteista sekä ilmiöistä, joiden kannalta laatua tarkastellaan. Laadun kehittämisen kannalta on kuitenkin tärkeää ymmärtää erilaisia laatuun liittyviä määrittelytapoja ja näkökulmia. Laatua täytyykin tarkastella aina monesta käsiteltävään ilmiöön liittyvästä perspektiivistä ja sen käsittäminen voi perustua joko olettamukseen tai kokemukseen. Laatu pyrkii hallitsemaan kaaosta ja tavoittelee tasapainoa. Laatutoiminnan tavoitteena on prosessien häiriöttömyys ja se onkin analoginen monille talouden, yhteiskunnan ja luonnon ilmiöille, joissa tapahtuu prosessien häiriöiden säätelyä. [Laatuakatemia, 2010.]

Laatu (engl. *quality*) on peräisin latinankielisestä sanasta *qualis*, (=millainen). Suomen kieleen sana laatu on tullut venäjänkielisestä sanasta *lad*, joka tarkoittaa rauhaa, sopuointia ja järjestystä. Liiketoiminnassa laatu merkitsee toimintaedellytysten, toiminnan ja sen tulosten suunnitelman mukaisuutta ja kykyä vastata odotuksiin. Laatua on tuotteen tai palvelun kyky täyttää sille asetetut tavoitteet ja se merkitsee suunnitelman mukaista toimintaa ja aiottuja tuloksia sekä asiakaslähtöisiä valintoja. Laatuun vaikuttavat monet toisiinsa kytköksissä olevat työvaiheet, kuten suunnittelu, tuotanto ja huolto. Nämä ovat toimintoja, joiden tuloksena asiakkaan kokema laatu syntyy. Laatuksiteereiksi kutsutaan tuotteeseen tai palveluun liittyviä ominaisuuksia, joiden suhteen laadukkuutta voidaan arvioida erilaisia laatumittareita käyttäen. Laatuksiteereitä voivat olla esimerkiksi maalatun pinnan paksuus ja tasaisuus (tuotteet) tai jonotusaika (palvelut). Laadun arvioinnissa koettu laatu on kuitenkin suhteellista ja arvioitsijasta riippuvaista. [Laatuakatemia, 2010.]

Ilmiönä laatu on havaittava, koettava ja siten myös mitattava ominaisuus. Laadun hallinta tuotantoprosesseissa olisi mahdotonta ilman näitä piirteitä. Tavaratuotannon prosessien seurannassa laadun mittaus perustuu tuotteiden ja niiden komponenttien konkreettisiin ja mitattaviin ominaisuuksiin. Sarjatuotannossa prosessin valvonta on tilastollista, jolloin tutkitaan sarjasta otettavien näyte-erien mittausarvojen keskiarvoa ja hajontaa, joita verrataan asetettuihin toleransseihin. Palveluiden laadun mittaamiseen liittyy aina enemmän mittausepävarmuutta, koska palveluiden laatu on usein hyvinkin paljon mielipiteisiin pohjautuva seikka. Esimerkiksi asiakastytyväisyyttä voidaan pitää koetun laadun ilmentymänä ja yritysmaailmassa laatu ymmärretäänkin usein samana asiana kuin asiakastytyväisyys. [Laatuakatemia, 2010.]

Laatuasioihin liittyvien sopimusten ja standardien noudattaminen edellyttää laadun dokumentointia. Esimerkiksi kun tuotteesta on olemassa esite, jossa sen ominaisuudet on kuvattuna, ja kaupankäyntiin liittyen on voimassa olevat yhteiset sopimukset, ei ostajan ole tarpeen käydä tuotteen valmistuspisteessä varmistamassa, että tuote ja sen valmistus täyttävät laadulliset vaatimukset. Menettelytapojen yhdenmukaisuus ja pysyvyys laatu-

toiminnan eri vaiheissa on yrityksissä varmistettu laatujärjestelmän dokumentoinnilla (kuva 1), jossa laatuun liittyvät asiat ovat selkeästi sovittuja ja vastuut kirjattuja. [Laatuakatemia, 2010.]



Kuva 1. Mallikuva laatujärjestelmän dokumentoinnista [Laatuakatemia, 2010]

Suuri osa laadun suunnittelusta tehdään itseään toistavien menettelytapojen kautta. Tällaiset menettelytavat on mietitty ja kirjoitettu perusteellisesti ja hyväksytty virallisesti. Kerran julkaistuina niistä tulee hyväksyttäviä tapoja johtaa yrityksen asioita. Onkin yleistä, että laatujohtamiseen liittyvät menettelytavat julkaistaan kokoelmana yrityksen laatukäsikirjassa. Merkittävä osa tällaisesta laatukäsikirjasta liittyy laadunvalvontaan. Laatukäsikirjat kasvattavat menettelytapojen hyödyllisyyttä monin eri tavoin. Menettelytavat on esimerkiksi helppo löytää ja ne on varmuudella hyväksytty organisaation ylemmillä tasoilla, koska ovat käsikirjaan päätyneet. Menettelytavat myös säilyvät muistivirheistä ja työntekijöiden vaihtuvuudesta huolimatta, koska ne on dokumentoitu. Yritysten laatukäsikirjojen tutkiminen osoittaa, että suurin osa niistä sisältää ydinsisältöä, joka on melko samanlaista yritysten kesken. Laadunvalvontaan liittyen tämä ydinsisältö on menettelytapoja, kuten edempänä tarkemmin esitellyn palautesilmukan sovellukset, prosessien kyvykkyyden takaaminen, suhteet hankkijoihin laatuasioissa, kokoelmat laatuinformaatiojärjestelmistä saadun datan analyysistä, henkilöstön kouluttamiseen liittyvää tietoa sekä tietoa tehtävistä tarkastuksista menettelytapojen noudattamisen varmistamiseksi. Tarve toistuviin laadunvalvontajärjestelmien käyttämiseen on johtanut standardien kehittymiseen teollisuudessa. Yleensä laatukäsikirjassa on ainakin seuraavat osiot: toimitusjohtajan virallinen lausunto, käsikirjan tarkoitus ja käyttöohje, yrityksen tai osaston laatupolitiikka, taulukot ja kuvaat liittyen laatu toimintaan, tarkastuksiin varautuminen ja lisäksi sovelluksia osastojen toiminnallisista tuotteista, prosesseista, bisnesprosesseista, jne. Johtajat voivat vaikuttaa laatukäsikirjan kattavuuteen monin eri tavoin, esimerkiksi osallistumalla kriteerien määrittämiseen, hyväksymällä luonnokset

sekä tarkastamalla kausittain käsikirjan ajankohtaisuuden ja yhdenmukaisuuden. [Juran, 1999.]

Laatutoiminnan ja tuotekehityksen voidaan sanoa palvelevan samaa tarkoitusta, sillä molemmat edustavat uuteen, parempaan järjestykseen pyrkimisen eri puolia: innovaatioista syntynyt tuotekehitys luo uusia tuotteita ja palveluita, jotka synnyttävät prosessiin epävakautta ja laadun vaihtelua erityisesti opettelu- ja sisäänajovaiheessa. Tuotannossa laatutoiminnan tavoitteena on tuotteiden ja palveluiden virheettömyys ja prosessien toiminnan odotuksenmukaisuus. [Laatuakatemia, 2010.]

2.1.3. Laadunvalvonta (quality control)

Kun laatu määritellään tietynlaiseksi erinomaisuuden asteeksi, voidaan laadunvalvonta määritellä joukoksi toimintoja, jotka on suunniteltu takaamaan tämä erinomaisuuden standardi [Tybor & al., 1988]. Laadunvalvonta on siis prosessi, jonka tarkoituksena on varmentaa tuotteen tai palvelun tietty laadun taso. Päämääränä laadunvalvonnalla on varmistaa, että tuotteet, palvelut tai prosessit täyttävät tietyt vaatimukset ollen samalla luotettavia, tyydyttäviä ja taloudellisesti kannattavia. Pääpiirteissään laadunvalvonta käsittää tuotteen, palvelun tai prosessin tutkimisen tiettyjen laadullisten minimirajojen mukaan. Toiminnan tavoitteena on tunnistaa tuotteet tai palvelut, jotka eivät täytä niille määritettyjä laadullisia standardeja. [Juran, 1999.]

Laadunvalvonta on yleisesti käytetty johtamisprosessi, jonka tavoitteena on tasapainon ylläpitäminen ja epäsuotuisan vaihtelevuuden estäminen suoritetuissa prosesseissa ja operaatioissa. Se on yksi kolmesta tavallisimmasta johtamisprosessista, joiden avulla laatua voidaan parantaa. Muut kaksi ovat laadun suunnittelu ja laadun parantaminen. Termi laadunvalvonta tuli esiin 1900-luvun alussa ja aluksi sen merkitys oli laajempi, käsittäen myös laadun suunnittelun. Myöhemmin laadunvalvonnalla alettiin tarkoittaa vain itse valvontaa. Tilastollisen laadunvalvonnan keksimisen myötä muodostui käsitys, jonka mukaan laadunvalvonta koostui tilastollisten menetelmien käytöstä. Luotettavuuden näkökulmasta väitettiin, että laadunvalvonta vaikutti laatuun vain testausten aikana, mutta ei tuotteen käyttöaikana. Termiä kokonaisvaltainen laatujohtaminen (total quality management, TQM) käytetään nykyään kaikenkattavana terminä. Kuitenkin termit ja niiden merkitys vaihtelevat ympäri maailmaa, käsityksen ollessa toisaalla laajempi, toisaalla kapeampi. [Juran, 1999.]

Laadunvalvonta voidaan usein sekoittaa laadunvarmistuksen kanssa. Näissä kahdessa erillisessä prosessissa onkin paljon yhteistä; molemmat arvioivat toiminnan laatua ja vertailevat sitä asetettuihin tavoitteisiin sekä toimivat poikkeamatilanteissa. Kuitenkin näillä toiminnoilla on myös eronsa. Laadunvalvonnan päätavoitteena on kontrollin säilyttäminen arvioimalla toimintaa operaatioiden aikana ja vertailemalla tätä toimintaa tavoitteisiin. Arvioinnista saatua tietoa käytetään hyödyksi operaatioissa. Laadunvarmistuksessa taas päätavoitteena on varmistaa kontrollin säilyminen arvioimalla toimin-

taa operaatioiden jälkeen ja kohdistamalla näin saatu tieto sekä operaatioihin että muille tietoa tarvitseville. [Juran, 1999.]

Tuotteen yleistä laatua määrittävät tavallisesti teollisuuden, valmistuksen tai kuluttajan vaatimukset. Perustyökaluja laadunvalvonnassa ovat esimerkiksi tuotanto-ohjeet ja -standardit, raaka-aineiden tarkat määritykset, valmistusprosessit, kriittisten valvontapisteiden määrittäminen, tilastot ja raportit, pakkausohjeet, tuoteselosteet, hygieniavaatimukset valmistusvaiheessa, takaisinvento-ohjelma sekä laboratorioanalyysit. Laadunvalvontaa voidaan helpottaa huomattavasti tuotestandardien avulla, eli kun on olemassa standardi, johon tuotteen fysikaalisia, kemiallisia ja muita ominaisuuksia voidaan vertailla. [Tybor & al., 1988.]

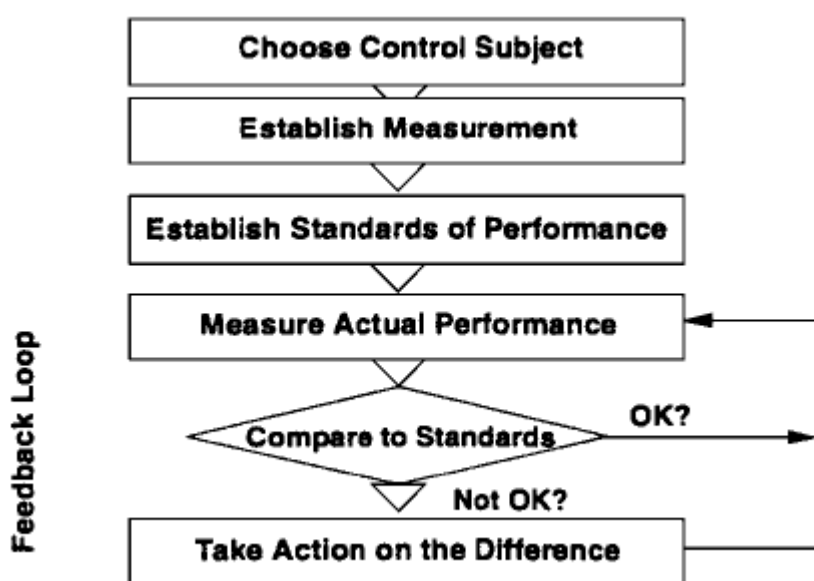
Esimerkiksi elintarvikealan pakkausteollisuudessa yksi ensimmäisistä asioista, jotka vaikuttavat kuluttajan ostopäätökseen, on pakkauksen ja etiketin ulkonäkö. Lisäksi huono pakkaaminen voi aiheuttaa negatiivisia vaikutuksia tuotteen laadulle. Jotta pakkaamisen perusvaatimukset täyttyisivät, täytyy tiettyjen seikkojen olla kunnossa. Esimerkiksi pakkauksen mukana tulisi toimittaa todistus siitä, että pakkaus on valmistettu hyväksytyistä materiaaleista ja materiaalikoostumus tulisi olla ilmoitettuna tässä todistuksessa. Erityisesti elintarvikealalla on tärkeää pakkausmateriaalien elintarvikekelpoisuus niiden ollessa suorassa kontaktissa elintarvikkeiden kanssa, sillä tietyt kemikaalit tai vieraat materiaalit voivat saastuttaa ruokatuotteen. Elintarvikealan pakkausteollisuudessa laadunvalvonnan keinoin valvottavia asioita ovat esimerkiksi pakkausten mitat ja mahdollisten tiivisteiden lujuus ja kansien sopivuus. Pakkauksen mittasuhteita (sekä sisäiset että ulkoiset) on valvottava, jotta välttyttäisiin ongelmilta, kuten ali- ja ylitäyttö, siirtyminen pakkauksen sisällä, vuotaminen tai pakkauksen rikkoutuminen. Virheet pakkauksen tiivisteiden lujuudessa ja kannen sopivuudessa voivat myös johtaa rikkoutumiseen sekä valumiseen tai tuotteen saastumiseen mikrobien päästessä pakkauksen sisään. Muita testattavia ja ilmoitettavia ominaisuuksia ovat mm. pistolujuus, pakkauksen ja mikroaaltouuninkestävyys, kyky rajoittaa ja sallia ilmavirtausta, kosteutta ja valoa sekä läpäisevyys, paksuus, joustavuus ja lämpötilankestävyys. Esimerkiksi meijerituotteet vaativat pakkaukselta kykyä suojata valolta ja liialta hapelta. Tärkeää pakkauksissa on myös grafiikka ja lain asettamien vaatimusten noudattaminen etiketissä tai painatuk- sissa vaadittavien merkintöjen suhteen. Laki vaatii ainakin tuotteen nimen, raaka- aineluettelon ja valmistuspaikan merkitsemistä elintarvikepakkaukseen tai etikettiin. [Tybor & al., 1988.]

Viime vuosikymmenien myötä on kasvanut trendi kehittää laadunvalvonnan tehokkuutta muodollisesti omaksumalla moderneja konsepteja, menetelmiä ja työkaluja. Tällaisia ovat esimerkiksi laadunvalvonnan systemaattinen suunnittelu operatiivisen henkilön osallistuessa, päätösten delegoiminen työvoimalle, tilastollisen prosessin hallinnan laaja soveltaminen ja siihen liittyvä henkilöstön kouluttaminen, systemaattinen prosessi korjaavien toimenpiteiden suorittamiseksi satunnaisten haitallisten muutosten tapahtuessa,

viralliset yrityskäsikirjat laadunvalvontaan sekä rakenteellinen tietoverkosto tosiasioiden perusteiden jakamiseksi päätöksenteon avuksi. [Juran, 1999.]

2.1.3.1 Palautesilmukka

Laadunvalvontaprosessi koostuu karkeasti sanottuna kolmesta vaiheesta: suoritteiden arvioiminen, sen vertaaminen asetettuihin tavoitteisiin sekä korjaavat toimenpiteet poikkeamatilanteissa. Näiden vaiheiden kuvaamisessa ja hahmottamisessa apuvälineenä käytetään tietynlaista palautesilmukkaa (feedback loop) (kuva 2). Palautesilmukka soveltuu käytettäväksi kaikenlaisiin ongelmiin, prosesseihin, tuotteisiin ja palveluihin. [Juran, 1999.] Seuraavaksi tutustutaan palautesilmukan vaiheisiin laadunvalvonnan kannalta.



Kuva 2. Laadunvalvontaprosessin etenemistä kuvaava palautesilmukka [Juran]

Ensimmäisessä palautesilmukan vaiheessa valitaan valvonnan kohde. Tämä voi olla mikä tahansa tuotteen tai prosessin ominaisuus, jonka ympärille palautesilmukkaa ryhdytään rakentamaan. Kohteen valinnassa voidaan huomioda esimerkiksi asiakkaan tarpeet tuotteen ominaisuuksiin liittyen, prosessin ominaisuudet, joilla on suora vaikutus tuotteen ominaisuuksiin sekä teolliset tai poliittiset standardit tai tarpeet turvallisuuden tai ympäristön suojelemiseksi. Valvonnan kohteet koostuvat esimerkiksi tuotteen tai prosessin piirteistä, jotka on asetettu teknisissä tiedoissa tai prosessiohjeissa. Markkinatilanteessa valvonnan kohteen valintaan vaikuttaa kilpailutilanne ja asiakkaan tarpeet korostuneesti. [Juran, 1999.]

Toisessa vaiheessa laaditaan sopiva mittausjärjestelmä, eli keinot, joilla prosessin tiettyä toimintoa tai tuotteen laadun tasoa voidaan mitata. Laadun mittaaminen on yksi vaikeimmista laatujohtamisen osa-alueista. Mittausjärjestelmän laatimiseen tarvitaan tarkka erittely mittaustavoista, -taajuudesta, tiedon tallentamisesta ja raportoinnista, tulosten

pohjalta tehdystä analyysistä sekä mittausten suorittajasta. [Juran, 1999.] Mittaussuunnitelmaa tarvitaan laadunvalvonnassa, jotta tuloksista tulisi johdonmukaisia. Jotta laadunvalvonta olisi riittävän tehokasta, tulee samoja asioita mitata aina samalla tavalla, sillä mittaustapaa muutettaessa tuloksista tulee epäjohdonmukaisia ja näin myös epäluotettavia. Mittaussuunnitelma on yhteenveto alueista, joita halutaan testata, kuinka usein niitä testataan ja missä vaiheessa tuotantoa niitä testataan. Suunnitelma sisältää myös arvion mittausten kestosta ja vaadittavista voimavaroista. [Basic quality control concepts, 2010.] Varsinaisen mittaamisen lisäksi tulee kiinnittää huomiota saatujen mittaustulosten syihin ja samalla mahdollisiin keinoihin joilla mahdollista ongelmaa voitaisiin ryhtyä korjaamaan [Juran, 1999].

Kolmas vaihe sisältää standardien laatimisen prosessin toiminnan ja tuotteen laadulle. Jokaiselle valvonnan kohteelle, eli tuotteen tai prosessin valvottavalle ominaisuudelle, on välttämätöntä laatia laadulliset tavoitteet, joiden saavuttamiseksi käytetään voimavaroja. *Tuotteiden* päätavoitteena on varsinkin kaupallisissa sovelluksissa kohdata asiakkaiden tarpeet. Varsinkin teollisuudessa asiakkaat erittelevät tarpeensa usein melko tarkasti, jolloin tavoitteet ovat varsin selkeitä. Toisaalta varsinkin kuluttajien tarpeet voivat olla ilmaistu hyvin epämääräisesti, jolloin ne täytyy tulkata tuottajan kielelle, jotta niistä voitaisiin tehdä tuotannon tavoitteita. Asiakkaan tarpeiden kohtaamisen lisäksi tavallisia tavoitteita tuotteille ovat luotettavuus ja kestävyys. Myös näiden tavoitteiden saavuttamisesta seuraa asiakastyytyväisyyttä ja -uskollisuutta, joka tulee näkymään yrityksen tuloksessa. Epäonnistumiset laatutavoitteiden laatimisessa tai täyttämässä voivat vaikuttaa vakavasti yrityksen kannattavuuteen sekä suorien, että epäsuorien kustannusten kautta (myynnin lasku, maineen menetys). Tuotteita tuottavilla *prosesseilla* on kahdenlaisia laatutavoitteita: tuottaa tuotteita, jotka kohtaavat asiakkaiden tarpeet, sekä toimia vakaasti ja ennustettavasti, eli kontrolloidusti. Myös *ihmisille ja osastoille* voidaan laatia laatutavoitteita, jolloin tavoitteiden saavuttamiseksi toimiminen voidaan palkita erilaisin keinoin. Tällaisia laatutavoitteet voivat koskea esimerkiksi asiakkaiden muuttuvien tarpeiden kohtaamista, kilpailun kohtaamista, prosessien tehokkuuden parantamista tai suunnitteluprosessien parantamista. [Juran, 1999.]

Neljännessä vaiheessa mitataan tuotteen tai prosessin todellinen toiminto. Tämä on laadunvalvonnan kriittinen vaihe. Mittaamiseen tarvitaan sensoria, eli välinettä joka mittauksen suorittaa. Sensori on erikoistunut ilmaisin, joka on suunniteltu tunnistamaan tietyn ilmiön olemassa olo ja voimakkuus sekä muuntamaan siitä saatava data päätöksenteossa käytettäväksi tiedoksi. Valtaosa sensoreista on kategorialtaan teknisiä instrumentteja, joilla mitataan tuotteen tai prosessin ominaisuuksia, esimerkiksi lämpömittarit, kellot, mittatikut ja vaa'at. Toinen merkittävä sensorikategoria on tietojärjestelmät ja niihin liittyvä raportointi, joka välittää yhteenvedon saadusta informaatiosta eteenpäin esimerkiksi johtoportaalille. Erilaisten sensorien käyttö valvonnassa on niin laaja-alaista, että se on johtanut tietokoneiden käyttöön apuna ilmaisussa ja mittausdatan muuttamisessa ymmärrettävään muotoon. Suurin osa sensoreista antaa laskelmansa mittayksiköinä –

jonkin laatuominaisuuden määritettynä numeraalisena määränä – joista tuttuja esimerkkejä ovat lämpöasteet, tunnit, metrit ja grammat. Myös ihmiset voivat toimia sensoreina. Esimerkkejä tällaisesta ovat erilaiset kyselyt ja haastattelut. Ihmiset tekevätkin huomattavan osuuden aistimisesta, mikä altistaa lukuisille virhelähteille. Mittauksista saatava informaatio on varsinkin organisaation alemmilla tasoilla reaaliaikaista ja sitä käytetään reaaliaikaiseen valvontaan. Ylemmillä tasoilla informaatiosta tehdään yhteenveto erilaisista näkökulmista laajempia mittauksia varten, trendien löytämiseksi ja ratkaisevien ongelmien tunnistamiseksi. [Juran, 1999.]

Viidennessä laadunvalvontaprosessin palautesilmukan vaiheessa mittaamalla saatuja tuloksia verrataan asetettuihin standardiarvoihin. Vertailun voi suorittaa joko henkilö tai tekninen laite ja vertailuprosessiin sisältyy mitatun laadun tavoitteeseen vertaamisen lisäksi myös havaittujen eroavaisuuksien tulkitseminen sekä jatkossa suoritettavien toimenpiteiden suunnittelu. [Juran, 1999.]

Kuudennessa, eli palautesilmukan viimeisessä vaiheessa ryhdytään toimenpiteisiin, kun havaitaan poikkeamia todellisen, mitatun, laadun ja laatutavoitteen välillä. Toimenpiteiden tavoitteena voi olla esimerkiksi prosessin palauttaminen tilaan, jossa se oli ennen havaittua poikkeamaa. Viimeinen askel palautesilmukan sulkemisessa on siis käynnistää muutos, joka palauttaa yhdenmukaisuuden laatutavoitteiden kanssa. Tämä askel on yleisesti tunnettu korjaavana toimenpiteenä. Korjaava toimenpide vaatii diagnoosia ja parannuksia, jotka ovat usein yksinkertaisempia kuin laadunparantaminen. Koska satunnaiset ongelmat ovat seurausta epäsuotuisista muutoksista, on diagnoosin päämääränä selvittää, mitä on muuttunut. Diagnoosia tehtäessä keskitytään siis siihen, mikä prosessissa on muuttunut ja korjauksen päämääränä on poistaa epäsuotuisa muutos ja palauttaa yhdenmukaisuus. Aina muutokset eivät kuitenkaan ole ilmeisiä, joten suurin este korjaavan toimenpiteen suorittamiseen on juuri diagnoosin tekeminen. Diagnoosissa käytettäviä menetelmiä voivat olla esimerkiksi valmistettujen tuotteiden tai prosessidatan vertailu ennen ja jälkeen ongelmien alkamista tai aikajanan rakentaminen tapahtumista ennen ja jälkeen satunnaisen muutoksen ilmaantumisesta. Näin nähdään mm. mikä on muuttunut ja mikä voisi olla muutoksen aiheuttaja. Kun diagnoosi on tehty, ja tiedetään syyt satunnaiselle muutokselle, pahin on ohi. Suurin osa parannuskeinoista koostuu takaisin paluusta siihen, mitä tehtiin aiemmin. Tämä on siis paluu tuttuun ja turvalliseen, ei matka tuntemattomaan (kuten olisi kroonisten tapausten kohdalla). Prosessisuunnitelmien tulisi tarjota keinoja prosessin säätämiseksi vaaditunlaiseksi, ja prosessin asetuksissa tehtävien muutosten määrässä ja niiden vaikutuksissa tuotteen ominaisuuksiin tulisi olla ennustettava suhde. [Juran, 1999.]

Palautesilmukka voidaan siis jakaa kuuteen vaiheeseen, kuten edellä, mutta jako voidaan tehdä myös toisin. Yksi laatujohtamisen suosima malli on ns. PDCA-kierto, eli Demingin kehä (kuva 3). Mallista on luotu erilaisia versioita, joista jotkut soveltuvat

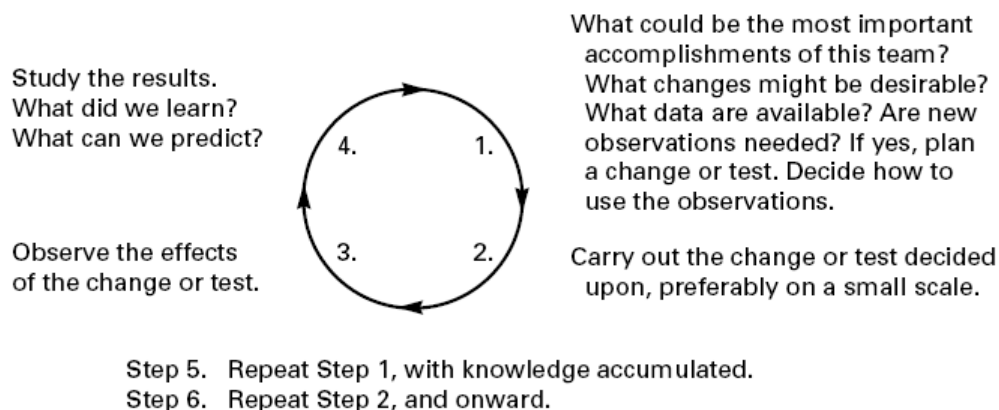
myös laadunparantamiseen ja -valvontaan. Tässä mallissa palautekaavio on jaettu neljään vaiheeseen seuraavasti:

PLAN (*suunnittele*): Valvonnan kohteen valitseminen ja tavoitteiden asettaminen

DO (*tee*): Prosessin ajaminen

CHECK (*tarkasta*): Mittaaminen ja tulosten arviointi

ACT (*toimi*): Toimielinten stimulointi toimiin ryhtymiseksi. [Juran, 1999.]



Kuva 3. PDCA-kerto eli Demingin kehä [Juran, 1999]

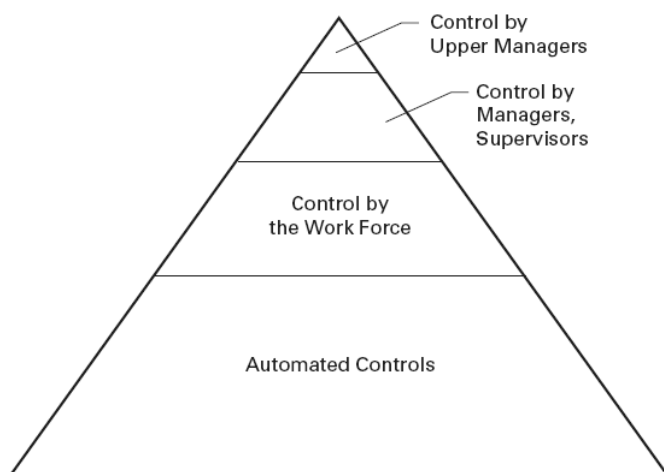
Palautesilmukka sisältää useita tehtäviä, joista kukin vaatii selkeän vastuunjaon. Tuotantoprosessin eri vaiheissa voi olla useita ihmisiä, jotka voivat noita tehtäviä suorittaa. Selkeän työnjaon olemassaolo kuitenkin helpottaa huomattavasti tehtävien suorittamista ja vähentää vastuuasioden aiheuttavaa hämmennystä. Avuksi tällaiseen työnjakoon voidaan esimerkiksi laatia erillinen taulukko, jossa olennaiset päätökset ja toimenpiteet on listattu vasempaan sarakkeeseen ja loput sarakkeet on jätetty työntekijöiden nimille. Taulukon tavoitteena on, että työnjako selkeytyy, eikä epäselvyyksiä vastuualueista jää. Ihannetilanteessa päätös valvottavan prosessin yhdenmukaisuudesta tavoitteisiin nähdessä tulisi olla työntekijöiden tekemä. Tällöin palautesilmukka olisi lyhin mahdollinen. Monissa prosesseissa tämä onkin todellinen järjestely. Muissa tapauksissa päätös prosessin yhdenmukaisuudesta on siirretty ei-operatiivisen henkilöstön, eli itsenäisten tarkastajien tehtäväksi. Tähän voi olla syynä esimerkiksi se, laatu ei ole prosessissa pääprioriteettina tai prosessi on kriittinen turvallisuuden tai ympäristön kannalta. Myös työntekijöiden ja johdon välinen luottamuspuola voi olla syynä menettelyyn. [Juran, 1999.]

Palautesilmukan oleellinen rooli on datan kerääminen ja analysointi. Tämä toiminto sisältyy tieteenalaan, joka tunnetaan tilastotieteenä. Menetelmiä ja työkaluja kutsutaan tilastollisiksi menetelmiksi ja niitä on käytetty pitkän apuna tiedonkeräämisessä analyysihin monilla eri aloilla. Nämä tilastolliset keinot ja työkalut ovat olleet tärkeä apu laadunvalvonnassa, laadunparantamisessa sekä laadun suunnittelussa. Tietäntyyppisille laatuongelmille tilastolliset keinot ovat hyvin hyödyllisiä, eikä tällaisia ongelmia voi ratkaista ilman sopivia tilastollisia keinoja. Myös työntekijät ovat kehittyneet käyttämään tilastoja työssään hyvin tuloksin. Tilastollisten työkalujen kanssa on kuitenkin

olemassa myös riskejä. On esimerkiksi vaarana ottaa työkalusuuntautunut lähestymistapa laatuun ongelma- tai tulossuuntautuneen sijaan. Oikea järjestys on ensin laatia tavoitteet ja sitten suunnitella miten ne saavutettaisiin, sisältäen myös sopivien työkalujen valinnan. Vastaavasti, kun ollaan tekemisissä ongelmien kanssa, paras keino on aloittaa ongelman tunnistamisesta, ja vasta tämän jälkeen selvittää miten ongelma tulisi ratkaista ja millaisilla työkaluilla. [Juran, 1999.]

2.1.3.2 Valvontapyramidi

Varsinaisia valvonnan kohteita, eli valvottavia piirteitä tai ominaisuuksia, on paljon, mutta valvottavia asioita on vieläkin enemmän. Jokaisessa tietyllä prosessilla tuotetussa tuotteessa voi olla useampi ominaisuus, joita valvotaan, ja näitä tuotettuja tuotteita voi olla valtavasti. Lisäksi saman yrityksen tuotannosta valvonta keskittyy tavallisesti kerralla useampiin erilaisiin tuotteisiin, jolloin valvottavien asioiden määrä taas moninkertaistuu. Valvottavien asioiden valtavan määrän vuoksi vastuu niiden valvomisesta on jaettu pyramidin muotoon valvontatyön eri osa-alueille: ei-inhimillinen (automatisoitu), työvoima ja yrityksen johto (kuva 4). [Juran, 1999.]



Kuva 4. Laadunvalvonnan valvontapyramidi [Juran, 1999]

Valvontapyramidi rakentuu siten, että pyramidin pohjalla ovat automatisoidut palautesilmukat ja virheiltä suojatut prosessit, joita operoidaan ilman ihmisten toimintaa, muutoin kuin huollon tai vastaavan osalta. Näillä ei-inhimillisillä keinoilla valvotaan valtaosaa asioista reaaliaikaisesti ja valvonnan kohteet ovat ainoastaan teknisiä. Pyramidin seuraavalla tasolla on valvonta, joka on työntekijöiden vastuulla. Antamalla työntekijöille merkittävästi vastuuta valvonnasta, voidaan saavuttaa esimerkiksi seuraavia etuja: palautesilmukan lyheneminen, työntekijöiden suurempi omistautuminen prosesseja kohtaan sekä johdon vapautuminen suunnitteluun ja kehittämiseen. Pyramidin huipuosissa on johdon suorittama valvonta. Nämä osat koostuvat muutamista huipputärkeistä valvonnan kohteista ja valvonta on delegoitu johdon useille tasoille, ylin johto mukaan lukien. Tällaisen valvonnan lisäksi johdon vastuulla on säätää kriteerejä, joilla

voidaan erottaa nämä huipputärkeät valvonnan kohteet muista ja delegoida muut pyramidin alemmille tasoille. [Juran, 1999.]

Koska mahdollisia valvonnan kohteita on paljon, täytyy suunnittelijoiden keskittyä tunnistamaan muutamat erityisen tärkeät kohteet sopivan tärkeysjärjestyksen aikaansaamiseksi. Esimerkiksi operatiivisiin prosesseihin vaikuttavat monet muuttujat, mutta usein yksi muuttuja on tärkeämpi kuin loput yhteensä. Tällaista muuttujaa kutsutaan vallitsevaksi muuttujaksi. Kun osataan tunnistaa vallitseva muuttuja muiden joukosta, on suunnittelijoiden helpompi jakaa resursseja ja prioriteetteja. Toinen tapa huipputärkeiden valvonnan kohteiden tunnistamiseksi on vakavuuden luokittelu, jossa jokainen tuotteen ominaisuus luokitellaan yhteen tai useampaan luokkaan, kuten kriittinen, merkittävä tai pieni. Nämä luokittelut ohjaavat suunnittelijan resurssien jakamista, tehtävien prioriteetteja, välineiden valintaa, tarkastusten ja testien taajuutta. [Juran, 1999.]

2.1.3.3 Laadunvalvonnan suunnittelu

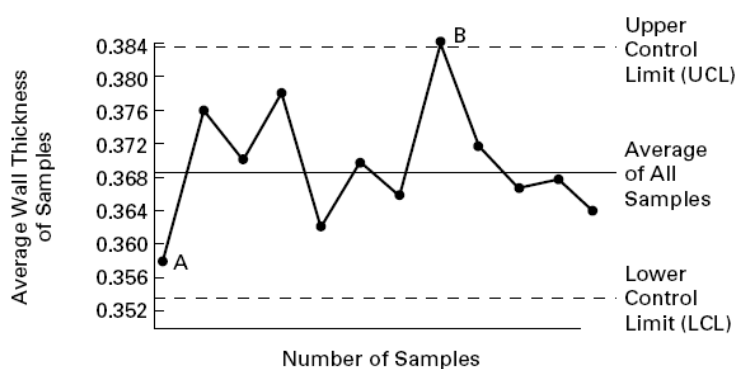
Laadunvalvonnan suunnittelu on toiminto, joka tarjoaa järjestelmän – käsitteitä, menetelmiä ja työkaluja – jonka välityksellä henkilöstö voi pitää prosessit vakaina ja siten tuottaa tuoteominaisuuksia, joita vaaditaan asiakkaiden tarpeiden tyydyttämiseksi. Vastuu laadunvalvonnan suunnittelusta on perinteisesti jaettu hyvin monipuolisesti valvottavasta prosessista riippuen suunnittelijoiden, asiantuntijoiden, johdon ja työvoiman osalle. Erityisen kriittisten prosessien kohdalla laadunvalvonnan suunnittelu on ollut niiden osapuolten vastuulla, jotka kyseisen operaationkin suunnittelevat. Vähemmän kriittisten prosessien kohdalla vastuu on tavallisesti ollut laatuasiantuntijoilla, joiden suunnitteluhahmotelmat on hyväksytetty operatiivisessa päässä. Viimeaikaiset trendit ovat lisänneet joukkuekonseptin käyttöä, jolloin laadunvalvonnan suunnittelusta vastaavat suunnittelutiimit, joiden jäseniä voivat olla mm. operatiivinen henkilöstö, toimittajat, asiakkaat, jne. Myös työvoiman osallisuutta on lisätty viimeaikoina yhä enemmän. Kukin tiimin jäsen tuntee hyvin oman osa-alueensa prosessista, mutta muita osa-alueita ja niiden välisiä suhteita vähemmän. Kokonaisuuksien hahmottamiseksi voidaan käyttää esimerkiksi vuokaavioita, joiden avulla on myös helpompi tunnistaa valvonnan kohteet, joiden ympärille palautesilmukat tullaan rakentamaan. [Juran, 1999.]

2.1.3.4 Prosessin valvonnan vaiheet ja yhdenmukaisuus

Perinteisesti laadunvalvontaa suoritetaan sekä tuotantoprosessien aikana, että niiden lopuksi. Valvontaa tapahtuu esimerkiksi kun raaka-aineet on vastaanotettu (ennen niiden siirtymistä tuotantoon), tuotteiden kulkiessa läpi tuotantoprosessin sekä tuotteiden ollessa valmiita. Prosessin valvonnassa tulee keskittyä erityisesti tiettyihin vaiheisiin. Ensimmäinen näistä vaiheista on prosessin alkuasetusten valvonta, jonka lopputuloksena syntyy päätös prosessin käynnistämisestä. Seuraava vaihe on varsinaisen prosessin valvonta, joka sijoittuu ajallisesti prosessin toimintavaiheeseen. Tämän valvonnan vaiheen lopputuloksena syntyy päätös prosessin jatkamisesta tai keskeyttämisestä ja valvonnan

aikana prosessin (tai tuotteen) suorituskykyä arvioidaan ja verrataan asetettuihin tavoitteisiin. Kolmantena vaiheena prosessin valvonnassa on tuotteen valvonta. Tämä vaihe suoritetaan kun tuotteita on tuotettu jo jonkun verran, ja tarkoituksena on määrittää, täyttääkö itse tuote sille asetetut laatuvaatimukset. Lisäksi myös tuotantovälineistön valvonta kuuluu osaksi prosessin valvontaa. Operatiivisissa prosesseissa käytetään lähes poikkeuksetta erilaisia fyysisiä välineitä ja nykyään käytössä on yhä enemmän myös automatisoituja prosesseja, tietokoneita ja robotteja. Prosessin tai tuotteen laatu riippuu siis yhä enemmän välineistön laadusta ja kunnossapidosta. [Juran, 1999.]

Kun mittauksissa havaittuja eroavaisuuksia prosessin ja tavoitteiden välillä tulkitaan, voidaan todeta, onko prosessi yhdenmukainen, eli vastaako se laatutavoitteitaan. Kun eroavaisuuksia havaitaan, on selvítettävä mistä nämä erot johtuvat. Havaitut eroavaisuudet ovat tavallisesti seurausta kahdesta vaihtoehtoisesta tapahtumasta: prosessin päämuuttujan poikkeava käyttäytyminen tai uuden päämuuttujan mukaantulo. Eroavaisuuden voivat johtua myös useamman pienen muuttujan vuorovaikutuksesta prosessissa. Demingin mukaan yksittäisistä päämuuttujista johtuvat vaihtelut ovat erityisiä syitä (special causes). Tällaiset erityiset syyt ovat satunnaisia ja niiden tapauksissa on suhteellisen helppo muodostaa diagnoosi ja keksiä korjaustoimenpiteet, koska niiden alkuperä on usein yksittäisissä muuttujissa. Deming luokittelee tavallisiin syihin (common causes) useiden pienempien muuttujien yhteisvaikutuksesta peräisin olevat syyt, jotka ovat tyypillisesti pitkäaikaisia ja vaikea diagnosoida ja korjata. Erityiset ja tavalliset syyt on tärkeää erottaa toistaan laadun poikkeamia tulkittaessa. Erityisyys on usein liitetty laadunvalvontaan ja tavalliset syyt laadunparantamiseen. Shewartin valvontakaavio on esimerkki keinosta, jota voidaan käyttää erityisyyden ja tavallisten syiden erottamiseksi toisistaan (kuva 5). [Juran, 1999.]



Kuva 5. Shewartin valvontakaavio, jonka avulla voidaan jakaa poikkeamien syyt erityisiin ja tavallisiin syihin [Juran, 1999]

Kaavion horisontaalinen asteikko kuvaa aikaa tai tarkistettavien tuotteiden määrää ja vertikaalinen suoritteiden laatua. Pisteet kuvaavat siis laadun esiintymistä ajan kuluessa tai mittausten edetessä. Lisäksi kaaviossa on kolme vaakalinjaa, joista keskimäinen kuvaa edellisen suoritteiden keskiarvoa ja siis odotettua tasoa. Kaksi muuta linjaa ovat tilastollisia rajaviivoja, joiden tehtävänä on erottaa erityisyys tavallisista syistä perustuen valittuun todennäköisyyden tasoon. Valvontarajojen sisällä sijaitsevat, historiallisesta

keskiarvosta eroavat pisteet (esimerkkipiste A) kuvaavat eroavaisuuksia, jotka suurella todennäköisyydellä johtuvat tavallisista syistä. Näin ollen voidaan olettaa, että tällaisten eroavaisuuksien syinä ei ole erityisyyttä. Erityisyyden puuttuessa vallitseva oletus on, että vain tavallisia syitä on läsnä ja prosessi on tilastollisesti valvottavissa. Tavallisista syistä johtuvat eroavaisuudet täytyy sietää, eikä toimenpiteitä tule tehdä, koska ne voivat vain pahentaa tilannetta. Kuitenkin asiakkaiden vaatimukset suuremmasta yhdenmukaisuudesta lisääntyvät jatkuvasti ja pakottavat toimittajat sitoutumaan projekteihin yhdenmukaisuuden parantamiseksi pienienkin muuttujien kohdalla. Kaavion pisteiden, jotka eroavat historiallisesta keskiarvosta ja ovat valvontarajojen ulkopuolella (esimerkkipiste B), kohdalla ei ole todennäköistä, että poikkeama olisi seurausta tavallisista syistä. Näin ollen oletetaan, että piste B on seurausta erityisyyistä. Tavallisesti tällaiset ”hallitsemattomat” pisteet johtavat ehdotuksiin korjaavien toimenpiteiden tekemisestä. Ihannetilanteessa tällaiset ehdotukset stimuloivat ripeitä korjaavia toimenpiteitä vallitsevan tilanteen palauttamiseksi. Käytännössä kuitenkin monet tällaiset poikkeamat eivät johda korjaaviin toimiin, koska erityisyyttä aiheuttavia muutoksia on liian monia, eikä henkilöstö pysty hallitsemaan niitä kaikkia. Prioriteetin ovat vakiintuneet taloudelliseen merkitykseen ja muihin tärkeisiin kriteereihin perustuviksi. Korjaavia toimenpiteitä tehdään suuren prioriteetin tapauksissa, loppujen odottaessa vuoroaan. [Juran, 1999.]

Valtaosan ihmishistoriasta laatutavoitteet ovat koostuneet tuotteen tai prosessin ominaisuuksista, tavallisesti sanallisesti määriteltynä. Teknologian kehitys stimuloi erilaisten mittauksien lisääntymistä ja trendiä laatutavoitteiden numeraaliseen määrittämiseen. Tällaisilla laatutavoitteilla on virallinen status ja näitä tavoitteita julkaistaan myös virallisina tuotekuvauksina. Tilastolliset valvontarajat esimerkiksi Shewartin valvontakaavion muodossa olivat tuntemattomia noin 1940-luvulle asti. Tällöin laatuasiantuntijat alkoivat laatia kaavioita operatiiviselle henkilöstölle, jolle ne olivat kuitenkin vieraita. Lisäksi kaaviot toivat lisätöitä tarpeettomien korjaavien toimenpiteiden muodossa, sillä ne osoittautuivat niin herkiksi muutosten havaitsemisessa, ettei kaikilla niiden havaitsemisella muutoksilla prosessissa ole vaikutusta lopputuotteen yhdenmukaisuuteen. Hämmennystä aiheutti erityisesti se, että korjauksia vaadittiin tekemään, vaikka tuotteet kohtaisivat tavoitteensa tiettyjen toleranssien sisällä. Operatiivinen henkilöstö ratkaisi ongelmansa jättämällä kaaviot huomioimatta. Tämä myötävaikutti 1950-luvulla tilastollisen laadunvalvonnan sortumiseen. 1980-luku toi uuden aallon kiinnostuksessa tilastollisten työkalujen soveltamiseen laadunvalvontaan. Monet operatiiviset työntekijät joutuivat läpikäymään koulutuksen tilastollisesta prosessin hallinnasta. Tämä koulutus auttoi vähentämään hämmennystä, mutta silti jonkin verran siitä säilyi. Päästäkseen eroon tästä hämmennyksestä, johtajien tulisi selvittää vastuuta korjaavista toimenpiteistä valvontarajojen ulkopuolella ja laatia ohjeistukset toimista, joihin tulee ryhtyä, kun pisteet ovat tilastollisten valvontarajojen ulkopuolella, mutta tuote pysyy silti toleransseissa. [Juran, 1999.]

Tuote voi olla joko määritelmän mukainen tai käyttöön soveltuva. Määritelmän mukainen tuote omaa tuuteominaisuudet, jotka on sisällytetty esimerkiksi tuoteselostuksiin tai standardeihin. Käyttöön soveltuva tuote ominaisuuksineen taas esimerkiksi täyttää asiakkaan tarpeet ja on turvallinen käyttää. Suurin osa tuotteista on määritelmän mukaisia ja vallitsevan käytännön mukaan ne lähetetään seuraavaan määränpäähän tai asiakkaalle. Oletuksena on, että tuotteet, jotka ovat määritelmän mukaisia, ovat myös sopivia käyttöön. Tämä oletus onkin voimassa suurimmalle osalle tapauksista. Niiden tuotteiden kohdalla, jotka eivät syystä tai toisesta ole määritelmän mukaisia, mietitään voisiko tuote kuitenkin olla käyttöön soveltuva. Tällaista päätöstä tehtäessä tulee ottaa huomioon esimerkiksi tuotteen mahdollinen loppukäyttäjä ja käyttökohde, mahdolliset riskit turvallisuuden tai ympäristön suhteen, toimituksen kiireellisyys ja päätöksen taloudellisten vaikutusten merkitys sekä tuottajalle että käyttäjälle. Tällainen pohdinta voidaan myös ohittaa määräämällä kaikki määritelmän suhteen epäyhdenmukaiset tuotteet käyttöön soveltumattomiksi (esimerkiksi lääkinnälliset tuotteet) tai tarkastamalla yksityiskohtaisesti jokaisen tuotteen soveltuvuuden käyttöön. Käyttöön soveltumattomista tuotteista voidaan päästä eroon monin eri tavoin. Ne voidaan esimerkiksi rouhia uudelleen tuotannon raaka-aineeksi, palauttaa toimittajalle tai myydä alennettuun hintaan. Tuotteiden, jotka täyttävät asiakkaan odotukset, käyttämättä jättäminen on tuhlausta. Kuitenkin, vielä pahempaa tuhlausta on lähettää eteenpäin tuotteita, jotka eivät täytä odotuksia. ”Laatutuguru” Demingin mukaan tarkastus, jonka tavoitteena on löytää huonot kappaleet ja heittää ne pois, tapahtuu myöhässä ja on tehotonta ja kallista. Laatu ei siis tule tarkastuksista vaan prosessiin tehtävistä parannuksista. [Juran, 1999.]

2.2. Konenäkö laadunvalvonnan välineenä

2.2.1. Mitä konenäkö on?

Konenäkö tarkoittaa tiedettä ja teknologiaa, jossa käytetään koneita hankkimaan ja käyttämään visuaalista tietoa teollisuudessa ja tuotannossa. Ensimmäiset konenäkösovellukset tulivat teollisuuden laadunvalvontaan 1980-luvun alussa. Konenäön hyödyntäminen laadunvalvonnassa lisää valvonnan tarkkuutta ja näin myös parantaa tuotteiden laatua. Konenäkötekniikan keinoin ihmissilmän ja aivojen näkökykyä jäljitellään koneiden ominaisuuksiksi. Konenäkösystemi aistii informaatiota kuvasta ja analysoi tämän informaation tehdäkseen sen sisällöstä tarvittavia päätöksiä – aivan kuten silmien ja aivojen yhteistyö toimii. Konenäkösystemi sisältää siis sekä visuaalisen aistimuksen, että kyvyn tulkita sitä. Systemin kuva-anturi on visuaalinen sensori, joka vastaanottaa valoa linssin läpi ja muuntaa sen sähköiseksi signaaliksi. Tietokone käsittelee tämän signaalin ja muodostaa sen avulla tulkinnan kuvastusta näkymästä. Tämän tulkinnan perusteella voidaan suorittaa tarvittavia toimenpiteitä. Koko edellä kuvattu prosessi kuvan muodostuksesta, sen analysointiin ja lopulliseen päätökseen on konenäkösystemin tehtävänä laadunvalvonnassa teollisuuden eri osa-alueilla. [ASM Handbook, 1989; Hornberg, 2006; Konenäköpäivä, 2010.]

Konenäön vertaaminen ihmissilmän ja -aivojen yhteistyöhön auttaa ymmärtämään mitä konenäkö on, mutta pohjimmiltaan nämä kaksi ovat keskenään hyvin erilaisia. Ihmisen kyky nähdä ja tehdä päätöksiä näkemänsä perusteella on paljon monimutkaisempi prosessi kuin vastaava kyky konenäön puolella. Ihmisen kyky on usein myös nopeampi. Toisaalta konenäkö pystyy moneen asiaan, joihin ihminen ei pysty, kuten ihmissilmälle näkymättömien tai haitallisten valon aallonpituuksien (ultravioletti ja infrapuna) hyödyntäminen. Ihmissilmällä voidaan esimerkiksi nähdä onko kappale hyvä vai huono, mutta konenäön avulla saadaan usein tarkempaa tietoa kappaleen virheistä, usein numeraalisena tietona. Erityisesti päätösten yhtenäisyys ja luotettavuus on konenäkösystemeissä parempi kuin ihmisten tekemissä visuaalisissa tarkastuksissa. Ihmisnäkö on usein parempi hitaissa ja kvalitatiivisissa, monimuotoisten näkymien tulkinnassa, kuten tuotteen pinnassa olevien suurehkojen virheiden havaitsemisessa. Konenäkö taas soveltuu paremmin kvantitatiiviseen havainnointiin, kuten tietyn piirteen omaavien rakenteiden määrän nopeaan tarkistukseen. Konenäön luotettavuutta lisää sen väsymättömyys toistuvia mittauksia tehtäessä sekä riippumattomuus sellaisista ympäristötekijöistä, jotka voivat vaikuttaa ihmisnäköön. Konenäkösystemien koskematon mittaustekniikka mahdollistaa myös erityisen helposti särkyvien tai kosketuksesta vahingoittuvien kappaleiden nopean ja luotettavan mittaamisen. Mittaustarkkuudet konenäkösystemeitä käytettäessä ovat ihmisnäköön verrattuna ylivoimaiset ja suorituskky säilyy suhteellisen suurillakin etäisyyksillä. Kaikki nämä piirteet mahdollistavat konenäön käytön useissa sovelluksissa, joihin ihmisnäkö ei pysty läheskään samalla suorituskvyllä. [ASM Handbook, 1989.]

2.2.2. Sovelluskohteita

Nykyään teollisuudessa tuotteiden laatu on yhä tärkeämpää, ja luotettava laadunvalvonta muodostaa tarpeen konenäköratkaisuille erilaisten tuotteiden tuotannossa. Tuotteiden laadullisten kriteerien tiukentuessa konenäkö koetaan usein luotettavammaksi laadunvalvontatekniikaksi, kuin esimerkiksi manuaaliset tarkastukset. Monet prosessit eivät enää olisi edes mahdollisia ilman konenäköteknologiaa. Suosion seurauksena konenäköteknikkaa kehitetään jatkuvasti tehokkaammaksi ja luotettavammaksi, joten ala kehittyy. [Hornberg, 2006.]

Monet konenäkösystemit ovat erikoistuneet suorittamaan jotain tiettyä, joskus monimutkaistakin tehtävää. Esimerkiksi tuotteissa olevat erilaiset viivakoodit voidaan tunnistaa ja lukea tehtävään erikoistuneen konenäkösystemin avulla. Samalla systemi tallentaa koodin ja sen mukana saatavat tuotetiedot ja tuotteen etenemistä esimerkiksi varastosta myyntiin voidaan seurata helpommin. Konenäön avulla erilaiset kappaleet voidaan myös tunnistaa esimerkiksi muodon, värin, koon tai pintakuvioidin perusteella. Monet muut konenäkösystemien tehtävät sisältävät usein myös tämän ominaisuuden, sillä esimerkiksi kappaleen mittaaminen edellyttää tavallisesti myös sen muodon määrittämisen. Tutkittavan kappaleen tai sen osan sijainti ja suunta voidaan määrittää ko-

nenäkösysteemillä esimerkiksi painopistekoordinaattien tai suuntakulmien avulla, esimerkiksi kun kappaleen siirtäminen robotiikan avulla vaatii robotiikalle tietoa kohteen sijainnista ja asennosta. Myös kokonaisuuksien tarkastaminen on konenäön avulla mahdollista. Tällöin voidaan esimerkiksi tarkastaa tuotteen kokoonpano ja varmistaa, että kaikki osat ovat oikein asennettuina, oikeille paikoille. Lisäksi konenäkötekniikkaa voidaan käyttää kappaleiden tai niiden tiettyjen piirteiden mittojen määrittämiseen sekä pintaominaisuuksien, kuten karheuden tai pintavirheiden, tarkistamiseen. Monissa sovelluksissa eri tehtäviä myös yhdistellään keskenään, jolloin samasta kappaleesta voidaan esimerkiksi tarkastaa sekä viivakoodi, kokoonpano ja mitat. Kuvaaminen esimerkiksi mittaamista varten onnistuu myös kohtuullisen suurilla nopeuksilla etenevien kappaleiden kohdalla, ja konenäköä voidaan käyttää myös kohteen liikkeen määrittämiseen. [Hornberg, 2006.]

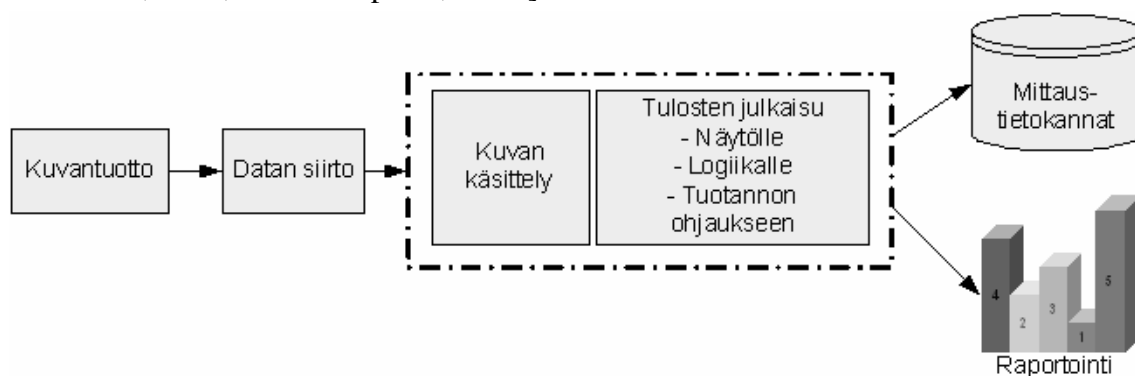
Konenäköä voidaan soveltaa seka-, sarja- ja massatuotannossa, sekä jatkuvassa tuotannossa, kuten esimerkiksi ekstruusioprosesseissa. Usein eri tuotantotyyppjä on myös yhdistelty. Erilaiset tuotantotyyppit ja valmistustavat asettavat erilaisia tarpeita konenäkösovelluksille. Tavallisesti nämä tarpeet voidaan huomioida ohjelmointivaiheessa. Konenäkösovelluksia käytetään sekä tuotantoprosessin jälkeen tapahtuvissa tuotteiden tarkastuksissa että tuotantoprosessin aikana tapahtuvassa prosessin valvonnassa. Tavoitteena voi olla esimerkiksi tuotteiden tunnistaminen ja toteaminen oikeanlaisiksi tai tilastojen kerääminen prosessin etenemisestä. [Hornberg, 2006.]

Myös konenäkösystemit voidaan luokitella eri tavoin. Erilaisia luokitteluperusteita ovat esimerkiksi systeemin ulottuvuus ja joustavuus. Joustavuuden perusteella systemit luokitellaan esimerkiksi sen mukaan, onko systemi vapaasti muunneltavissa ja ohjelmoitavissa. Ulottuvuuden perusteella luokiteltaessa eri systeemejä on viisi luokkaa: 0D-, 1D-, 2D-, 2,5D- ja 3D-systemit. 0D- ja 1D-systemit ovat suhteellisen alkeellisia, pistemäisiä ja viivamaisia alueita tutkivia systeemejä. 2D- ja 2,5D-systemit ovat nykyään melko yleisiä, ja 3D-systemit yleistyvät jatkuvasti tekniikan kehittyessä. 3D-systemeillä saadaan esiin tutkittavan kohteen topografia, josta saadaan paljon sellaista mittaustietoa, jota ei 2D-systemeillä saada. [Hornberg, 2006.] 2,5D-systemi tarkoittaa 3D-systemiä, jolla kuitenkin jää joitain piirteitä kohteesta näkymättä esimerkiksi kohteen monimutkaisen geometrian vuoksi. Tällaisia näkymättömiin jääviä piirteitä ovat esimerkiksi kohteessa olevien kulmien varjoon jäävät alueet. Yleisimpiä 3D-systemeissä käytettäviä tekniikoita ovat stereokuvaus ja laserkolmiomittaus. [Jokinen, 2009.] Stereokuvaus on metodi, jossa hyödynnetään suuntaeroa etäisyyden mittaamisen periaatteena käyttämällä kahta tai useampaa kameraa eri suunnissa, ja lopulta yhdistämällä eri kameroiden ottamat kuvat. Näin saadaan aikaan kolmiulotteinen kuva kohteesta, samalla periaatteella kuin oikean ja vasemman silmän yhteistyö toimii. Myös yhden kameran käyttö eri valaistusgeometrioilla johtaa samanlaisiin tuloksiin kun kuvat yhdistetään. Kolmiomittauksella saadaan 3D-dataa kohteen eri alueiden pisteiden koordinaateista etäisyyksinä lasermittalaitteeseen eräänlaisena pistepilvenä, josta muodostuvaa

kuva voidaan käyttää esimerkiksi kohteen pinnan tutkimiseen tai sitä voidaan verrata kohteen CAD-kuvaan. Myös etäisyyskuva, jossa 2D kuvassa valon intensiteetti kuvaa etäisyysarvoja, käytetään 3D-datan esittämiseksi pistepilven lisäksi. Kolmiomittaus perustuu valaistuksen avulla kohteesta kameraan ja kamerasta takaisin valonlähteeseen muodostetun suorakulmaisen kolmion trigonometriaan ja valon etenemisnopeuteen, joiden perusteella saadaan laskettua tarkat koordinaatit kohteen pinnan pisteille. Koska kahden valonsäteen välinen kulma on tunnettu, voidaan etäisyys laskea jopa mikromillin tarkkuudella. Kolmiomittauksessa käytetään tyypillisesti valonlähteenä joko LED:iä tai laseria. [ASM Handbook, 1989; Konenäköpäivä, 2010; Jokinen, 2009.]

2.2.3. Konenäkösysteemin toiminta

Konenäön kykyjen ja rajoitusten ymmärtämiseksi on hyvä tietää miten konenäkösystemi toimii (kuva 6). Konenäkösysteemi koostuu seuraavista osista: valaistus, optiikka, kamera, laitteisto ja ohjelmisto. Nämä ovat ydinasiat, mutta konenäköön liittyy aina myös jotain seuraavista: automaatio, mekaaninen suunnittelu, yhteys IT-teknologian kanssa sekä sähköinen suunnittelu. Näistä kaikista valaistus on kuitenkin avaintekijä, vaikkakin kaikki ovat tärkeitä. Valaistus määrittää muita osa-alueita, kuten optiikan, kameran, laitteiston ja ohjelmiston. Kaikkien näiden komponenttien välillä on erilaisia liitantoja ja kiinnityssysteemejä, jolloin eri komponenttien välinen yhteys toimii saumattomasti ja lopputuloksena on kokonaisuutena toimiva konenäkösystemi. [ASM Handbook, 1989; Konenäköpäivä, 2010.]



Kuva 6: Konenäkösysteemin toiminta [Konenäköpäivä, 2010]

Kuvaaminen on tavallisesti ensimmäinen osa konenäköprosessia. Kamera ottaa kuvan kohteesta valaistuskomponenttien valaistessa kohteen siten, että siitä saadaan sovelluksen kannalta optimaalinen kuva. Kuvaamiseen sisältyy kuvadatan siirtäminen tietokoneelle ja sen digitalisoiminen tarvittaessa. Seuraavassa prosessin vaiheessa tapahtuu saadun kuvadatan käsittely halutun informaation saamiseksi. Tämän jälkeen informaatio tulkitaan ja analysoidaan algoritmien avulla esimerkiksi mittaamalla valitut piirteet tai kuvailemalla määrättyjä kuvan ominaisuuksia. Kun kuvan piirteet on saatu analysoitua, täytyy tehdä johtopäätökset, kuten kuvatun kohteen tunnistettavuus kuvan perusteella, tiettyjen parametrien määrittäminen. Näiden johtopäätösten perusteella voidaan tehdä ratkaisuja esimerkiksi kuvatun kappaleen hyväksymisestä tai hylkäämisestä vertaamalla

sitä tiettyihin ennaltasovittuihin tavoitearvoihin. Lopuksi kuvan perusteella tehty johdopäätökset johdetaan toiminnaksi, jonka voi suorittaa esimerkiksi tietokone, ihminen tai robotiikka. Esimerkkejä eri toiminnoista ovat tietyn muotoisten tai kokoisten kappaleiden lukumäärän laskeminen, tietynlaisten kappaleiden siirtäminen pois liukuhihnalta tai mittausdatan tai tarkastettujen viivakoodien tallentaminen muistiin ja julkaiseminen halutussa muodossa. [ASM Handbook, 1989.]

2.2.4. Konenäkösysteemin suunnittelun vaiheet ja peruskomponentit

Konenäkösysteemin suunnitteluprosessin vaiheita ovat tehtävän erittely, systeemin suunnittelu, kustannusten laskeminen sekä systeemin toteuttaminen. Onnistunut suunnittelu perustuu yksityiskohtaiseen tehtävän erittelyyn. Myös mahdollisista rajoituksista tulee ottaa selvää tehtävää eriteltäessä. Sekä itse tehtävä, että sen suoritusympäristö tulee eritellä mahdollisimman tarkasti, jotta konenäkösysteemin ohjelmointi, toteutus ja käyttö sujuisivat ongelmitta. Lähtötietoina konenäkösysteemin suunnittelussa voivat olla tehtävän asettamat vaatimukset, kuten syklinopeus, tarkkuus, kappaleen koko ja väri sekä kappaleen mahdollinen liike ja liikkeen nopeus. Erittelyn lisäksi tärkeää on myös virherajojen asettaminen, jolloin määritellään sellaiset kappaleet, jotka läpäisevät tarkastuksen, sekä myös sellaiset, jotka sitä eivät läpäise. Yksi haasteellisimmista tehtävistä konenäkösysteemiä suunniteltaessa on selvittää, mitä ominaisuuksia kappaleesta halutaan tietää, jotta systeemi täyttäisi tehtävänsä. On myös tärkeää tietää perusasiat tutkittavan kappaleen valmistusprosessista, jotta tiedettäisiin millaiset tuotannosta johtuvat virheet ovat kappaleelle ominaisia. Tästä syystä tuotantoprosessista vastaava henkilö onkin usein tärkeä kontakti systeemin suunnittelijalle, sillä hän tietää usein parhaiten millaisia tuotteita tuotetaan, mitä niiltä odotetaan ja millaisia ongelmia niissä esiintyy. [Hornberg, 2006.]

Kerättyjen tietojen perusteella voidaan suunnitella käytettävät kuvaus- ja valaistustekniikat ja -geometriat sekä muut sellaiset tekijät, jotka vaikuttavat tiettyjen piirteiden havaitsemiseen konenäkösysteemin avulla. Kuvausgeometrialla tarkoitetaan sitä, miten kuvaamisen kannalta välttämätön valaistus on aseteltu kameraan ja kuvauskohteisiin nähden. Suunnitteluvaiheessa valitaan myös kamera- ja linssityyppi, määritellään kuva-alue (*field of view*, *FOV*), lasketaan resoluutio, suunnitellaan mekaanisten ja sähköisten liitäntöjen perusteet ja laitteiston alusta, huomioidaan mahdolliset häiriötekijät sekä suunnitellaan tai valitaan käytettävä ohjelmisto. Kustannukset voidaan alustavasti määrittää laitteiston ja ohjelmiston perusteella, loput kustannuksista määräytyvät jatkossa. [Hornberg, 2006.] Seuraavaksi kerrotaan tarkemmin projektin suunnittelun ja toteuttamisen vaiheista.

2.2.4.1 Tehtävän erittely

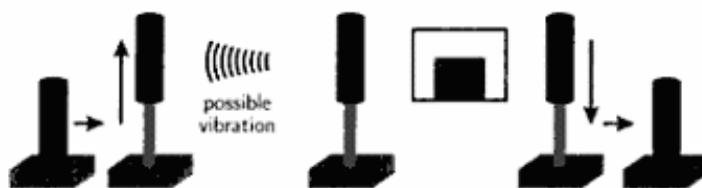
Konenäkösysteemin tehtävä ja olosuhteet tulee määritellä tarkoin ennen projektin käynnistämistä. Erittely sisältää esimerkiksi kuvattavan kohteen kuvailun sekä nopeus- ja

tarkkuusvaatimukset, joita systeemiltä odotetaan. Tehtävää eritellessä määritellään myös mitä hyötyä konenäkösystemillä voidaan tai pyritään saavuttamaan, kuten esimerkiksi tuotantoprosessiin kuuluvan tuotteiden tarkastuksen nopeuttaminen, helpottaminen tai sen tarkkuuden tai luotettavuuden lisääminen. [Hornberg, 2006.]

Tehtävän erittelyvaiheessa tutkittavista kohteista tarvitaan tarkka kuvaus, sekä mahdollisesti myös riittävä otos näytteitä sekä oikeanlaisista että virheellisistä kappaleista. Kohteen kuvauksen tulee sisältää ainakin tietoja siitä, onko kuvattavana erillisiä kappaleita vai jatkuvaa materiaalia, mitkä ovat kohteiden minimi- ja maksimimitat, millaisia vaihteluita niiden muodoissa esiintyy, millaisia piirteitä halutaan kuvata ja millaisia poikkeamia näissä piirteissä esiintyy virheellisissä kappaleissa. Myös kohteiden pinta- ja väriominaisuudet sekä niissä mahdollisesti tuotantoprosessin aikana tapahtuvat muutokset tulee eritellä. Vaikka konenäkösystemien avaintekijä on usein niiden kyky toimia ilman, että tutkittaviin kohteisiin tarvitsee koskea, on erityisen herkkien kappaleiden kohdalla käytävä läpi myös mahdolliset vauriot, joita esimerkiksi lamppujen lämpö, säteily tai kappaleiden mahdollinen kiinnitys kuvauslustalle voi niissä aiheuttaa. Jos samalla systeemillä tullaan tutkimaan keskenään erilaisia kappaleita, tulee eri kappaletyyppien erot kuvailla yksityiskohtaisesti, eli miten kappaleet eroavat toisistaan esimerkiksi dimensioiden, muodon tai värin suhteen. Käytettävän mittausohjelman tulee pystyä toimimaan yhtä luotettavasti ja tehokkaasti kaikkien määriteltujen kappaletyyppien kanssa. Voi myös olla tärkeää, että systeemin loppukäyttäjän on mahdollista itse ohjelmoida systeemin käyttöön tiedot uudenlaisista kappaleista ilman konenäköasiantuntijan apua. Erittelyvaiheessa on hyödyllistä tietää myös tuotetaanko erilaisia kappaleita sekaisin eri tuotantolinjastoilla, vai onko kullekin tyyppille oma tietty linjastonsa. Jälkimmäisessä tapauksessa tuotantolinjastoihin liitettävän konenäkösystemin ei tarvitse tunnistaa kappaleita ennen mittaamista tai muuta kuvasta tehtävää analyysiä, jolloin säästyy aikaa. Kappaleen erittelyssä kriittisiä tekijöitä ovat myös kappaleen mahdollinen liike, sijainti ja kappaleiden määrä kuva-alueella. Kuvattavien kappaleiden liike voi pysähtyä kuvaamisen ajaksi, jolloin täytyy tietää pysähdysten kesto ja kappaleen sijainti pysähdysten aikana, tai olla jatkuvaa, jolloin täytyy tietää liikkeen nopeus ja kiihtyvyys. Jos kuva-alueella on kerrallaan useampi kuin yksi kappale, täytyy huomioida ainakin kappaleiden lukumäärä ja niiden päällekkäisyys. Jos kappaleet ovat osittain päällekkäin tai ovat kosketuksissa toistensa kanssa, voivat jotkut piirteet jäädä näkymättömiin ja haitata kuvan analysointia tai mittaamista. [Hornberg, 2006.]

Konenäkösystemiltä vaadittava tarkkuus on määriteltävä, koska se vaikuttaa systeemiltä vaadittavaan resoluutioon. Systeemin suunnittelijalla täytyy siis olla käsitys pienimmästä piirteestä, joka kappaleesta täytyy kuvan perusteella saada tutkittua tai mitattua. Myös se, tuleeko näkösystemin pystyä 3D-tarkasteluun, vai riittääkö 2D, tai mahdollisesti 1D, tulee selvittää. Koska konenäkösystemi on tavallisesti osana tuotantoketjua, sen täytyy suorittaa tehtävänsä tiettyssä ajassa. Tämä vaikuttaa laitteiston valintaan ja rajoittaa myös joidenkin algoritmien käyttöä. Aikarajoja määrittäessä tulee huomioida

esimerkiksi prosessin syklin aika, tiedonpoiminnan aloittamishetki, maksimiprosessointiaika sekä tuotantocykliin lukumäärä tarkastuksesta loppukäyttöön. Erityisesti soveluksissa, joissa kuvataan erillisiä kappaleita, yleensä liikkumattomina ja mahdollisesti tuotantolinjalta erilleen siirrettynä, tulee huomioida koko kuvausprosessiin kuluva aika. Tuotannon syklin aika ei tarkoita suoraan sitä aikaa, joka kappaleen kuvaamiseen voidaan käyttää. Kuvausaika on todellisuudessa huomattavasti lyhyempi, sillä koko kuvausprosessiin käytettävään aikaan tulee sisällyttää myös kappaleen siirtäminen kuvauspisteeseen, ja kappaleen liikuttamisesta aiheutuneen värähtelyn vakautumiseen kuluva aika (kuva 7). [Hornberg, 2006.]



Kuva 7: Kuvausprosessin vaiheet yksittäisiä kappaleita kuvattaessa [Hornberg, 2006].

Tämä on erityisen merkityksellistä tilanteissa, joissa kappale siirretään pois tuotantolinjalta kuvaamisen ajaksi ja kuvaamisen jälkeen taas takaisin tuotantolinjalle, jolloin koko prosessiin käytettävä aika tulee olla verrattavissa tuotannon syklin aikaan. Käytettävän ajan lisäksi tällainen prosessi vaatii myös merkittävän paljon viestintää eri komponenttien välillä, jotta kuvanottohetki ja kappaleen siirrot saadaan ajoitettua kokonaisuuden kannalta juuri oikein. Jatkuvan prosessin kuvaaminen ja tilanne, jossa kuvattuja kappaleita ei tarvitse palauttaa tuotantolinjalle ovat tässä suhteessa huomattavasti yksinkertaisempia. [Hornberg, 2006.]

Tehtävän erittelyvaiheessa tulee myös huomioida konenäkösystemin käyttöympäristön mahdolliset häiriötekijät, kuten lämpötilan vaihtelut, kosteus, lika, iskut sekä ympäröivä valaistus. Myös käyttöympäristön fyysiseen tilaan liittyvät asiat tulee ottaa huomioon, erityisesti jos tilankäytön ongelmat ovat ennustettavissa esimerkiksi tilan ahtauden tai turvallisuustekijöiden vuoksi. [Hornberg, 2006.]

2.2.4.2 Systemin suunnittelu

Kun tiedot konenäkösystemillä toteutettavasta tehtävästä ja sen rajoituksista, tutkittavista kappaleista sekä toimintaympäristöön liittyvistä asioista on selvitetty, voidaan ryhtyä suunnittelemaan itse konenäkösystemiä. Suunnittelutyön hoitaa tavallisesti konenäköasiantuntija, eli esimerkiksi laitteistoja valmistavan yrityksen edustaja, mutta myös systemin loppukäyttäjän on hyvä olla selvillä joistain perusasioista. [Hornberg, 2006.]

Kamera ja optiikka

Kameratyypin valinta on yksi suunnittelun perusvaiheista, jonka perusteella voidaan valita sovellukseen sopiva kameramalli. Konenäkösovelluksissa käytettävät kamerat

voidaan karkeasti luokitella esimerkiksi käyttöliittymän (analoginen/digitaalinen), ilmaisimen toimintaperiaatteen (väri/harmaasävy), rakenteen (CCD/CMOS) ja signaalinkäsittelytoimintojen saatavuuden (yksinkertainen/äly-/erikoisvalmisteinen kamera) perusteella. [Konenäköpäivä, 2010.] Konenäkökameroissa on tiettyjä erikoisominaisuuksia verrattuna tavallisiin kameroihin. Niissä ei esimerkiksi ole integroitua linssyä, vaan standardoitu adapteri. Niissä on myös vankkarakenteiset kotelot useilla kiinnitysmahdollisuuksilla sekä normitetut ja lukittavat liittimet. Konenäkökameroilla on mahdollista työskennellä jatkuvassa toimintatilassa ja myös ulkoinen käynnistäminen on mahdollista. Ne ovat riittävän nopeita suurnopeussovelluksille, eivätkä ole yhtä herkkiä tietyille olosuhteille, kuten lämpötilan vaihteluille, kuin tavalliset kamerrat. [Hornberg, 2006.]

Perinteisten kameroiden lisäksi konenäkösystemeissä käytetään myös älykameroita. Älykameroissa yhdistyy suurin osa perinteisen konenäkösystemin käyttämistä komponenteista, kuten kuvauksen synkronointi, valaistuksen hallinta, kuvaaminen, kuvankäsittely ja tulosten käsittely sekä tulo/lähtö-toiminto (I/O), yhteen pakettiin. Käyttöön otosta riippuen, kaikki osat (sisältää joskus myös jopa valaistuksen) voidaan pakata yhteen koteloon. Älykamerat ovat mekaanisesti kestäviä ja soveltuvat hyvin teollisiin ympäristöihin niin koteloinniltaan kuin kaapeloinniltaan. Ne ohjelmoidaan erillisellä laitteella tai PC:llä, minkä jälkeen systeemi toimii itsenäisesti. Älykamerat on varustettu liittimillä muiden laitteistojen kanssa viestimisen mahdollistamiseksi ja saman valmistajan älykamerat voidaan tavallisesti liittää yhteen melko helposti, jolloin tiedonsiirto kameralta toiselle on helppoa. Esimerkiksi yksinkertaisimmat älykameralaitteet voidaan opettaa vain hyväksytyjen ja hylättyjen tuotteiden ja piirteiden tunnistamiseen, mikä rajoittaa käytön vain visuaaliseen tarkastukseen. Kehittyneemmät etsintäoperaatiot perustuvat geometrisiin ominaisuuksiin (kuten kappaleiden reunat), harmaasävykuvien harmaasävytilastoihin sekä erilaisten piirteiden tunnistamiseen. Kehittyneemmillä laitteilla voidaankin mitata harmaasävytilastoja, etsiä ja sovittaa suoria linjoja ja kaaria sekä mitata kohteiden pinta-alaa. Älykameran etuja ovat esimerkiksi erinomainen soveltuminen teollisiin ympäristöihin, suora tuki muiden systeemien kanssa kommunikointiin, graafinen ohjelmointi (ei tarvita ohjelmointikielen kokemusta) sekä se, ettei erillistä tietokonetta tarvita. Kuitenkaan älykamerat eivät sovellu monimutkaisiin sovelluksiin, tai sellaisiin joissa vaaditaan paljon laskentaa. Niihin ei voi säilöä suuria määriä tietoa pienen muistitilan vuoksi ja sovellukset, jotka vaativat paljon graafista viestintää systeemin käyttäjän kanssa voiva olla vaikeita toteuttaa. [Hornberg, 2006; Konenäköpäivä, 2010.]

Kameratyyppin valinta voidaan tehdä esimerkiksi kuvattavan kohteen liikkeen perusteella. Liikkuvaa kohdetta kuvattaessa käytetään tavallisesti linjapyyhkäisykameraa (*line scan camera*), jolla onnistuu myös jatkuvan kuvadatan prosessointi esimerkiksi ekstruusioprosessin valvonnassa. Linjapyyhkäisykameroissa käytettävät yksiulotteiset linjasensorit pyyhkäisevät kuvattavan kappaleen esimerkiksi leveyden suhteen linja kerrallaan ja tällaiset kamerasysteemit vaativatkin liikettä kameran ja kohteen välillä. Näin

voidaan tarkastella esimerkiksi kuvattavan kalvon leveyttä ja kalvon pintavirheitä Liik-kumattoman kohteen kuvauksessa käytetään usein aluepyyhkäisykameraa (*area scan camera*), jolla prosessoidaan yleensä vain yksittäisiä kuvia. Aluepyyhkäisykameroissa käytetään kaksiulotteisia aluesensoreita. Yleisesti ottaen aluepyyhkäisykamerat ovat tuotannossa yleisempiä ja myös edullisempia. [Hornberg, 2006.]

Riippuen erilaisten mahdollisten pikseleitä määrittävien digitaalisten arvojen määrästä, voidaan näkösystemit luokitella joko binäärisiksi tai harmaasävyksysteemeiksi. Binäärisissä systeemeissä kunkin pikselin jännitetaso on joko 0 tai 1, riippuen siitä, onko jännite suurempi vai pienempi kuin ennalta sovittu taso. Tällöin valon intensiteetti pikseleissä on joko valkoinen tai musta, riippuen siitä, kuinka tumma tai vaalea kuva on. Myös harmaasävyksysteemeissä pikseleille on määrätty digitaaliset arvot, sen mukaan onko tietty jännitteen arvo ylittynyt vai alittunut. Binäärisen systeemin kahteen eri arvoon verrattuna harmaasävyksysteemeissä eri arvoja voi olla 256, jotka sisältävät mustan ja valkoisen lisäksi harmaan eri sävyt. Tämä mahdollistaa harmaasävyksysteemien käytön myös kohteiden pintaominaisuuksien vertailussa. Harmaasävyksysteemit eivät ole yhtä herkkiä valaistuksen sijoittelulle kuin binääriset systeemit, joissa valaistus voi vaikuttaa kynnysarvoon. Harmaasävykuvista saadaan selvästi enemmän tietoa kuin binäärisistä kuvista. [ASM Handbook, 1989.]

Kuvanmuodostus harmaasävykameralla tapahtuu kun suuri määrä fotoneja törmää pikselialueelle altistumisaikana ja muodostaa suuren määrän elektroneja. Nämä elektronit muodostavat varauksen, jonka kondensaattori muuntaa jännitteeksi. Jännitettä voimistetaan ja digitalisoidaan, jonka lopputuloksena on digitaalinen harmaasävyarvo. Kullakin pikselillä on oma harmaasävyarvonsa, ja kuvan harmaasävyerot syntyvät juuri pikselien arvojen perusteella. Pikselit ovat pieniä samankokoisia alueita kameran ilmaisimella, jotka keräävät valoenergiaa, eli fotoneja. Pikseleissä fotonit muutetaan sähköisiksi varauksiksi. Kuvaa muodostettaessa pikselien sallitaan keräävän tätä sähköistä varausta lyhyen valotusajan verran, jonka jälkeen muodostuneet varaukset luetaan järjestyksessä, pikseli pikseliltä. Mitä suurempi sähkövaraus pikseleihin muodostuu, sitä enemmän niihin tulee valoa sisään valotuksen aikana ja sitä kirkkaampi pikseli on. Värien aistimiseen on olemassa monenlaisia vaihtoehtoja, kuten erilaiset värisuodattimet. Harmaasävykuvassa käsiteltävän informaation määrä on paljon pienempi kuin värikuvassa, koska siinä on mukana vain pikselien kirkkauserot, ei värieroja. Todellinen resoluutio on siis harmaasävykameroilla usein parempi kuin halvoilla värikameroilla ja harmaasävykameraa suositellaankin käytettäväksi, kun värien saaminen kuvaan ei ole välttämätöntä. [Hornberg, 2006; Konenäköpäivä, 2010.]

Optinen systeemi lähettää tietoa, kuten intensiteettijakauma, värijakauma, muodot ja rakenteet kuvatilaa, josta tämä informaatio tallennetaan kuvaksi. Yksinkertaisimmillaan tällainen tiedon lähettäminen tapahtuu valonsäteiden välityksellä. Optiikan lait kertovat näiden säteiden tyypillisestä käyttäytymisestä, ja lakien perusteella voidaan suun-

nitella juuri oikeanlaisia linssisysteemejä ja -geometrioita tietynlaisen informaation vastaanottamiseksi. [ASM Handbook, 1989.] Optiikkaa konenäkösovellukselle valittaessa tulee kiinnittää huomiota tarvittavaan kuva-alueeseen, sekä tarvittavaan resoluutioon. Myös minimi- ja maksimityöskentelyetäisyydet, syvyystarkkuusvaatimukset, kameran ilmaisimen koko sekä optiset liitännät tulee huomioida. Konenäkösystemin kuva-alue (FOV) valitaan seuraavien tekijöiden perusteella: maksimi kappalekoko, maksimi vaihtelu kappaleen asennossa ja suunnassa (sijainnin toleranssi), kappalekoon vaihtelumarginaali sekä kameran sensorin sivusuhte, joka useimmissa kameroissa on 4:3. Vaadittava FOV lasketaan joka suunnassa näiden tekijöiden summana. Systemiltä vaadittavan resoluution taas määrää kuvattavan kohteen pienin piirre, joka tulee olla tarkasti nähtävissä. Resoluution, eli erotuskyvyn kannalta merkittäviä tekijöitä ovat kameran sensorin resoluutio, spatiaaliresoluutio sekä vaadittava mittaustarkkuus. Kameran sensorin resoluutiolla tarkoitetaan rivien ja sarakkeiden määrää, jotka kamera muodostaa. Tämä mitataan pikseleinä. Spatiaaliresoluutio tarkoittaa pikseleiden määrää mittayksikköä kohden kuvattun tuotteen pinnalla. Spatiaaliresoluutio saadaan pysymään vakiona, kun kamera asetetaan kohtisuoraan kuvattavan kohteen yläpuolelle. Yleisesti ottaen resoluutioltaan pienemmät kamerat ovat parempia, sillä niissä on vähemmän virheitä, mutta jotkut sovellukset voivat vaatia suuren resoluution. Linssin suunnittelussa tarvittava tieto on pikselien määrän lisäksi myös yhden pikselin koko (*cell size*). [Hornberg, 2006.]

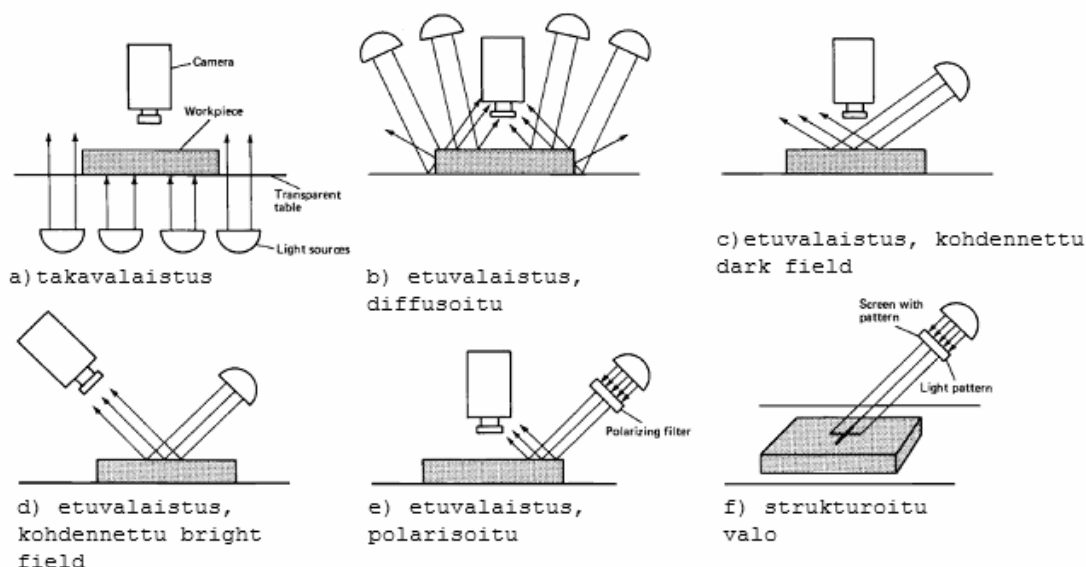
Kun kameran pyyhkäisytyyppi sekä vaadittava kuva-alue ja resoluutio on määritetty, voi systemin suunnittelusta vastaava asiantuntija valita sopivan kameramallin, kuvankaappaussystemin ja laitteistoalustan. Tässä vaiheessa voidaan tehdä päätös älykameroiden, kompaktien näkösystemien ja PC-pohjaisten systemien välillä. Valintaa tehdessä huomioitavia asioita ovat muiden muassa käyttöjärjestelmän valinta, käyttäjäystävällisyys, laitteiston kuormittuminen, muistin tarve, käytettävissä olevat liitännät ja saatavuus. Optiikan osalta myös linssin valinta voidaan tehdä tässä vaiheessa. Tärkeä parametri linssin valinnassa on seisontaetäisyys (*standoff distance*). Yleisesti ottaen suurempien etäisyyksien käyttäminen parantaa kuvan laatua ja käytettävissä oleva tila tulisi käyttää sopivan seisontaetäisyyden saavuttamiseksi. Suuren resoluution kameroissa linssivaatimukset ovat suuremmat kuin standardikameroissa: liian heikon linssin käyttäminen korkean resoluution sensorissa voi aiheuttaa huonon kuvalaadun, vaikka pienemmän resoluution kamerassa kuva olisi samalla linssillä laadultaan hyvä. Peilien ja prismojen käyttö voi helpottaa isojen kameroiden sijoittamista pieniin tiloihin. Kamera-linssisystemien kalibrointi säännöllisin väliajoin on tärkeää riittävän tarkkuuden säilyttämiseksi. [Hornberg, 2006.]

Valaistus

Kameran ja optiikan suunnittelun jälkeen voidaan valita oikeanlainen valaistus sovellukseen. Samasta kappaleesta saadaan monta keskenään erilaista kuvaa pelkästään valaistusta muokkaamalla, ja valaistus onkin konenäkösystemien joustavimpia, ja usein myös edullisimpia komponentteja. Sen avulla voidaan joko luoda tai pilata lopullinen

sovellus. Optimivalaistuksen eteen tehtävät ponnistukset lisäävät systeemin tarkastuskykyä ja tarkkuutta, mikä puolestaan voi vähentää käytettävän ohjelmiston monimutkaisuutta. Valaistus vaikuttaa merkittävästi optimaalisen tuloksen saavuttamiseen ja valaistusta valittaessa tuleekin huomioida lukuisia seikkoja itse tehtävästä ja kuvattavasta kohteesta. Valaistus määrittää kuvan piirteiden signaalien laadun. Optimaalisessa kuvassa kaikki riippuu kontrastista ja tärkeät piirteet tuleekin esittää maksimikontrastilla. Ilman kuvan oikeaa kirkkautta ja kontrastia, joka saadaan aikaan valon avulla, ei mikään algoritmi pysty erottamaan kuvasta kappaleen reunoja eikä siis tunnistamaan saati mittaamaan kappaletta. [Hornberg, 2006; Konenäköpäivä, 2010.]

Valaistuksen päätavoitteena on siis kontrastin maksimoiminen kiinnostavissa piirteissä ja sen minimoiminen muualla. Myös ympäröivän valon muutoksille, näytteen käsittelyn eroille ja normaaleille poikkeamille yritetään saada minimaalinen herkkyys kontrastin avulla. Valaistuksen kannalta neljä kuvaamisen kulmakiveä on: geometria, eli miten valonlähteet sijoitetaan kuvausympäristössä; kaava, eli valaistuksen rakenne; aallonpituus, eli valaistuksen väri sekä käytettävät suodattimet. Kontrastin kannalta tärkein tekijä on valon suunta. Käytettävä valo voi joko levitä tasaisesti joka suunnasta tai olla ohjattu tietyissä kulmissa kohteeseen. Kohteen pintaan kohdistetun valon perusteella voidaan määrittää useita tekijöitä, kuten kohteen suunta, pintakäsittely sekä käytetyn valaistuksen tyyppi ja sijainti. Valonlähteen oikeanlainen sijoittaminen on erittäin tärkeää, koska sillä on suuri merkitys kuvan kontrastiin. Kuvassa 8 on esitetty joitain tavallisimmin käytettyjä valaistustekniikoita. [ASM Handbook, 1989; Konenäköpäivä, 2010.]



Kuva 8: Konenäkösysteemeissä tavallisesti käytettyjä valaistustekniikoita [ASM Handbook, 1989].

Valaistuksen pääsystemit ovat etu- ja takavallo. Kun halutaan yksinkertainen varjokuva (*silhouette*), voidaan käyttää takavalaistusta maksimaalisen kontrastin aikaansaamiseksi. Jos taas halutaan esille tiettyjä pinnan piirteitä, on etuvalaistus parempi vaihtoehto.

Kolmiulotteisen kuvan aikaansaamiseksi sivuvalaistus tai strukturoitu valaistus voi olla tarpeen. [ASM Handbook, 1989.] Takavallo on yleensä takaapäin valaistun paneelin kaltaisen ja tavallisia taustavalolähteitä ovat LED ja loisteputket, joita on saatavilla useita kokoja eri intensiteeteillä. Yleensä takavallo on diffusoitua, eli hajavaloa, mutta erityisesti mittaussovelluksissa voidaan käyttää myös takavaloa, joka on fokusoitu kondensaattorilinsillä kameran suuntaan. Etuvalon kanssa käytettäviä valaistustekniikoita ovat esimerkiksi diffusoitu valo ja kohdennettu valo. Diffusoitu valo tulee kaikista kulmista, esimerkkinä kupolivalot, ja kohdennettu valo tulee vain tietyiltä kulma-alueilta ja voi olla esimerkiksi rengas- tai viivavaloa. Kirkaskenttävalaistus (*bright field*) on kohdennettu heijastumaan kuvattavan kappaleen pinnasta kameraan, jolloin kappaleen tasainen pinta näyttää kirkkaalta ja epätasaisuudet tummilta, koska valo heijastuu niistä kamerasta poispäin. Tummakenttävalaistuksella (*dark field*) kappaleesta heijastuva valo taas on ohjattu kamerasta poispäin, jolloin kappaleen tasainen pinta on tumma ja pinnan epätasaisuudet vaaleita. [Hornberg, 2006.]

Erilaisia konenäkösystemeissä käytettäviä valolähteitä ovat esimerkiksi hehku- ja halogeenilamput, xenon-lamput, loisteputket, LED-valot (*light emitting diodes*), optiset kuidut, UV-lamput ja laser. LED-valot ovat konenäkösovelluksissa käytetyistä valolähteistä yleisimpiä ja niiden etuja ovat esimerkiksi kapea aallonpituusjakauma, tasajännitteen käyttö, pitkäikäisyys ja pieni koko. Tarvittaessa LED-valolla saadaan toteutettua myös joissain sovelluksissa hyödyllinen valon välkkyminen. Laservaloa käytetään usein erikoissovelluksissa, kuten kolmiomittauksissa. Valolähteet voidaan luokitella esimerkiksi niiden emittoiman spektrin perusteella: esimerkiksi hehkulamput tuottavat sekoi- tuksen eri aallonpituuksia jatkuvana spektrinä, josta kuitenkin vain osa käytetään, mikä laskee tehokkuutta, kun taas esimerkiksi LED-lamput emittoivat valoa vain rajatulla spektrillä, jolloin tehokkuus on korkeampi. [Hornberg, 2006.] Esimerkiksi käytettävän valon spektri vaikuttaa saavutettavaan kontrastiin ja näin ollen myös konenäkösystemin tarkkuuteen. Polarisoidulla valolla voidaan parantaa kontrastia valoa heijastavilla pinnoilla, kuten lasilla ja metallilla. Myös kohteen väri ja ympäröivä valo vaikuttavat valaistuksen valintaan. Valolähteen valinnassa tulisi kiinnittää huomiota sen tehokkuuteen, spektrin väriin ja muotoon, kirkkauteen, homogeenisyyteen syttymis- ja sammumisaikoihin, käyttöikään, välkkymismahdollisuuteen sovelluksesta riippuen, fyysiseen muotoon ja dimensioihin sekä ympäristöystävällisyyteen. [ASM Handbook, 1989.] Myös mekaanisen ympäristön yhteensopivuus tulee tarkastaa. Konenäkösystemin valaistuskomponentin suunnittelussa on huomioitava esimerkiksi valolähteen mekaaninen kiinnittäminen ja suojaava kotelointi, helppo huollettavuus ja uusittavuus, optiset elementit, jotka esimerkiksi kääntävät tai heijastavat valoa (peilit, prismat), valaistuksen hallintalaitteistot sekä kaapelointi. Lisäksi tulee huomioida sähköturvallisuus ja esimerkiksi valolähteen kuumenemisesta aiheutuvat paloturvallisuus seikat. On myös muistettava, että jotkut valolähteet, kuten laser, voivat olla haitallisia ihmisilmän verkkokalvolle, ja joidenkin valolähteiden emittoimat aallonpituudet ovat ihmisilmälle näkymättömiä, kuten UV-valo. [Hornberg, 2006; Konenäköpäivä, 2010.]

Optimaalisen valaistussysteemin saavuttamiseksi on usein tehokkaampaa lähestyä aihetta ensin teorian kannalta, esimerkiksi poissulkien vaihtoehtoja, jotka eivät ainakaan ole sovelluksen kannalta järkeviä. Teoreettisen lähestymisen jälkeen on systeemin varmentaminen kokeilemalla erilaisten testikappaleiden kanssa kuitenkin välttämätön vaihe. Kokeiluvaiheessa voidaan esimerkiksi erilaiset kuvausryhmittelyt dokumentoida, ja erilaisilla ryhmittelyillä ja systeemeillä saatuja kuvia vertailla parhaan mahdollisen kontrastin löytämiseksi. Kaikilla valolähteillä on omat piirteensä, jotka sopivat hyvin tiettyihin sovelluksiin. Useampia erilaisia piirteitä kohteista tutkittaessa voivat myös erilaiset valaistussysteemit olla tarpeen. Esimerkiksi erilaisten lamppujen käyttäminen sovelluksen valaisemisessa voi olla tarpeellista, mutta tällöin lamppujen yhteisvaikutukset kuvan kannalta on tutkittava. Epätoivottujen yhteisvaikutusten välttämiseksi voidaan esimerkiksi käyttää useampaa kameran sijaintia, ottaa kuvat erilaisilla kameroilla eri valaistuksilla peräkkäisessä järjestyksessä tai käyttää eri kameroita erivärisille valoille. [Hornberg, 2006.]

Valaistusta suunnitellessa on huomioitava kuvausympäristön fysikaaliset rajoitukset ja vaatimukset sekä näytteen, taustan ja valon välinen vuorovaikutus. Jokainen kuvattava kohde käyttäytyy valon kanssa eri tavoin. Näyte voi esimerkiksi emittoida, absorboida tai heijastaa valoa erilailla kuin toinen näyte, ja siinä voi olla valon kanssa erilailla käyttäytyviä pintoja (kiillotetut, matat). Esimerkiksi samanlaiset muovikappaleet vain hie-man erivärisinä näkyvät samassa valaistuksessa keskenään erilailla, jolloin koko konenäkösystemi voi kohdata ongelman. Kohdekappaleessa valon käyttäytymiseen vaikuttavia piirteitä ovat mm. väri, muoto, pintaominaisuudet, materiaali jakauma, viimeistely, reunojen terävyys sekä käytetyt pinnoitteet. [Hornberg, 2006; Konenäköpäivä, 2010.]

Mekaaninen suunnittelu

Konenäkösysteemin mekaaninen suunnittelu voidaan tehdä, kun päätökset käytettävistä kameroista, linseistä ja valaistusratkaisuista on tehty. Esimerkiksi systeemin vaatima fyysinen tila täytyy huomioida. Tällä tarkoitetaan kuvaamiseen ja systeemin toimintaan vaadittavaa tilaa toimintaympäristössä, eli esimerkiksi kameran ja valaistuksen etäisyyksiä toisistaan ja kohteesta, vaihtoehtoisia kuvausgeometrioita ja käytettävien johtojen ja kaapeleiden pituuksia. Systeemin ympärille tarvitaan tilaa luonnollisesti myös asennus-, huolto- ja ylläpitotoimia, kuten puhdistusta ja lampunvaihtoja varten. Tilan lisäksi konenäkösystemin toimintaympäristössä tulee huomioida tilan normaali valaistus, laitteistoon kohdistuvat iskut ja värinä, lämpötila- ja kosteusvaihtelut, virtalähteen saatavuus, tilan likaisuus ja pölyisyys, sekä turvallisuusasiat. Teollisessa ympäristössä käytettävät laitteistot on usein tärkeää suojata käyttöympäristössä esiintyviltä häiriötekijöiltä, kuten värinältä ja iskuilta ja joissain tapauksissa systeemin mekaaninen eristäminen on välttämätöntä. Konenäkösystemiä voidaan joutua suojaamaan myös ympäröivältä valolta, mutta toisaalta joskus myös ympäristön suojaaminen konenäkösystemiä

missä käytetyltä valolta voi olla tarpeen. Konenäkösysteemi voi vaatia myös liikkuvuutta työpisteen suhteen. Säättöliikettä tarvitaan suhteellisen harvoin, yleensä sovelluksen käyttöönoton alkuvaiheessa, kun kameraa, valaistusta, yms. säädetään sopivalle sijainnille kuvaustapahtuman onnistumiseksi. Kun taas kuvattavan kohteen tyyppi vaihtuu, voidaan tarvita lisää liikuteltavuutta laitteistolta. Prosessointiliikkuvuutta vaaditaan sovelluksissa, joissa esimerkiksi kuvataan liikkuvaa kohdetta tai kun kuvauksen aikana halutaan saada valaistusta esim. kappaleen sisäosiin tai eri puolille kappaletta. Kameroiden ja valaistuksen sijainnin tulisi siis olla suhteellisen helposti muunneltavissa, mutta niiden tahaton liikuttaminen tulisi voida estää. [Hornberg, 2006.]

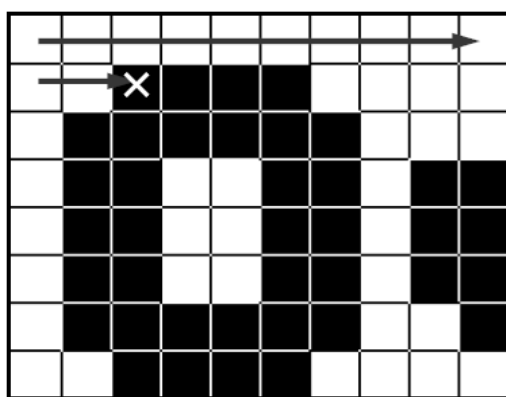
Systeemin sähkösuunnittelussa määritellään käytettävä virtalähde ja tarpeelliset turvaluokitukset ja niiden mukaiset koteloinnit kameralle ja valaistukselle. Sähköisessä suunnittelussa on huomioitava myös käytettävien sähkökaapeleiden pituudet ja niiden asettelu käyttöympäristössä. Myös mekaanisten järjestelmien uusittavuus on tärkeää, koska laitteita, kuten lamppuja, voidaan joutua käytön aikana vaihtamaan uusiin. [Hornberg, 2006.] Koska konenäkösysteemiä käytetään hyvin harvoin ilman vuorovaikutusta muiden laitteiden, kuten CAD/CAM-laitteiden, robottien tai verkkoaseman kanssa, tulee myös mahdollisuus eri laitteiden välisille liitännöille ja lisälaitteiden sijoittaminen toimintaympäristöön ottaa huomioon. [ASM Handbook, 1989.] Systeemiin tarvitaan myös liitäntöjä, joilla tuotteen analysoinnin jälkeen tieto voidaan lähettää eteenpäin joko ihmiselle tai koneelle, joka suorittaa tarvittavat tehtävät. Samalla voidaan seurata tuotantoa ja valvoa tuotantoa reaaliajassa, lähettää palautetta tuotantolinjoille ja -koneille sekä ohjelmoida systeemejä. Esimerkiksi ihminen-kone-liitännällä hallitaan systeemiä jonkin operaattorin, kuten tietokoneen kautta, kone-kone-liitännällä taas voidaan viestiä eri laitteiden välillä tai tallentaa tietoja. Erilaisia liitäntöjä käytetään tavallisimmin tulosten käsittelyyn ja tarkasteluun, tutkittavan kappaletyyppin ilmoittamiseen, tarkastelun käynnistämiseen, tulosten tallentamiseen sekä tarkastustapojen tallentamiseen. [Hornberg, 2006.]

Ohjelmisto

Aiemmin on käsitelty konenäkösysteemin laitteistokomponentteja, joita tarvitaan kuvan muodostamiseen ja sen siirtämiseen tietokoneelle sekä kuvaustilanteen optimoimiseen. Kuitenkaan mikään näistä komponenteista ei varsinaisesti ”näe” eli kykene erittelemään saamaansa informaatiota. Tämä on verrattavissa ihmisnäköön: ilman silmiä ei voi nähdä, mutta silmien lisäksi tarvitaan myös aivojen näkökeskus muuttamaan silmien antamat signaalit ymmärrettävään muotoon, eli kuviksi. Konenäössä tähän tarvitaan erilaisia kuvankäsittelyohjelmia ja -algoritmeja, joiden avulla muiden systeemin komponenttien hankkimasta tiedosta saadaan eriteltyä juuri ne tiedot, joita sovelluksessa tarvitaan. Kuva on konenäössä perustietorakenne, joka saadaan kameran avulla kohteesta ja siirretään tietokoneen muistiin. Kuten aiemmin jo todettiin, pikseleitä voidaan ajatella näytteinä energiasta, joka kohdistuu sensorin kennoon valotuksen aikana, ja jotka tallentuvat kameran sensorille kameratyyppistä riippuen eri tavoin. Alussa kameran aikaansaama ku-

löin voidaan koko kuvan käsittelyn sijaan käsitellä vain paikallisia kuva-alueita, jolloin laskenta-aika käytetään hyödyllisemmin. Piirteen tulkinnessa suoritetaan erotetulle piirteelle mittausta, varmistus tai koodinluku. Saatua tuloksia tulkitaan esimerkiksi vertailemalla niitä toleransseihin. [Hornberg, 2006.]

Algoritmien toiminta voi perustua esimerkiksi kuvan sisältämien pikseleiden harmaasävyerojen havaitsemiseen. Harmaasävyerojen perusteella voidaan esimerkiksi erottaa kohde taustasta tai kiinnostava piirre kohteesta. Kiinnostavia piirteitä voivat olla esimerkiksi erilaiset geometriset muodot, kuten kaaret, kulmat ja ympyrät, joita voidaan mitata tai joiden perusteella voidaan esimerkiksi määrittää kohteen asento. [Hornberg, 2006.] Kuvassa 9 on esitetty yksinkertaistettuna esimerkki kohteen muotoa määrittävän työkalun toimintaperiaatteesta binäärisessä mustavalkokuvassa. Oletuksena on, että taustan pikselit ovat tässä tapauksessa valkoisia ja kohteen mustia. Ensin työkalu etsii kohteen reunan, eli kohdan jossa pikseleiden kirkkausero muuttuu merkittävästi, tässä tapauksessa valkoisesta mustaan. Etsintä tapahtuu rivi kerrallaan, vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas. Kun reuna on löytynyt, sen koordinaatit tallennetaan löytyneen kohteen reunan aloituspisteeksi, ja reunaa lähdetään seuraamaan vastaavasti koordinaatteja tallentaen, kunnes kaikki kohteen pikselit on käyty läpi. [Konenäkö tuotantoautomaatiossa, 2010.] Harmaasävykuvassa tapahtuma olisi periaatteen tasolla muuten vastaava, mutta kohteen pikselit ja taustan pikselit erotettaisiin toisistaan sovitun harmaasävyarvokynnyksen perusteella. Harmaasävykuvassa kohteen, ja usein myös kiinnostavien piirteiden, reuna-alueilla pikseleiden harmaasävyarvo muuttuu nopeasti ja merkittävästi, joten reunojen alueet voidaan erottaa taustasta pikseleiden harmaasävyerojen perusteella. [Hornberg, 2006.]



Kuva 9: Kohteen muodon määrittämiseen käytettävän työkalun toimintaperiaate binäärisessä mustavalkokuvassa. Kuvassa nuolet kuvaavat reunanetsinnän etenemissuuntaa ja X kuvaa havaittua reunan alkamiskohtaa. [Konenäkö tuotantoautomaatiossa, 2010.]

Kuitenkin esimerkiksi tällaiseen reunojen tunnistamiseen perustuva kohteiden dimensioiden mittaaminen ja mittausten tarkkuus riippuvat valitusta harmaasävyarvokynnyksestä: väärällä kynnyksarvolla saadaan mittaustuloksista liian suuria tai liian pieniä. Kohteen ja taustan rajalla harmaasävyn arvo voi muuttua myös suhteellisen pehmeästi, jolloin

kohteen reunan tarkka havaitseminen ja reunan alkamiskohdan määrittäminen on vaikeaa. Myös tutkittavassa kappaleessa olevat reunojen pyöristykset tai materiaalin epätasaisuus vaikeuttavat reunojen tarkkaa havaitsemista ja vaikuttavat mittausten tarkkuuteen. Harmaasävykuvasta tavoitteena on löytää pikseleiden harmaasävyarvojen avulla mahdollisimman vakaa linja kuvasta, jota voidaan pitää kohteen reunaviivana. Valaistuksella on erittäin suuri merkitys reunaviivan havaitsemisen ja terävyyden kannalta, joten valaistus on pyrittävä pitämään vakiona. [Hornberg, 2006.]

2.2.4.3 Kustannukset

Kun konenäkösystemi ja sovellusprojekti on pääpiirteissään suunniteltu, on vuorossa kustannusten arviointi. Kustannukset voidaan jakaa alkukehitys- ja käyttökustannuksiin. Alkukehityskustannukset koostuvat esimerkiksi projektin johtamisesta, perussuunnittelusta, laitteiston osista, ohjelmiston lisensseistä ja kehittämisestä, asennustöistä, systemin testaamisesta, henkilöstön kouluttamisesta ja eri vaiheiden dokumentoinnista. Jos päädytään valmistamaan useampi, kuin yksi systemi, tulevat seuraavien systemien kustannukset olemaan alhaisemmat, sillä perussuunnittelu, ohjelmiston kehittäminen, osa testauksesta sekä dokumentointi voidaan jättää pois. Käyttökustannuksiin kuuluvat esimerkiksi ylläpito (puhdistus), laitteiston uusiminen (lamput), kulutus (sähkö, paineilmä) sekä kustannukset systemin muokkaamisesta tutkittavan tuotteen muuttuessa. Kaikkia systemin komponentteja suunniteltaessa tulee huomioda myös kustannuksiin liittyvät asiat. Esimerkiksi hankintahinnaltaan edullinen valaistusjärjestelmä voi osoittautua käyttökustannuksiltaan huomattavan kalliiksi lyhyen käyttöajan tai merkittävän sähkönkulutuksen vuoksi, jolloin hankintahinnaltaan kalliimpi järjestelmä voi pitkällä aikavälillä tulla käyttökustannuksiltaan edullisemmaksi. [Hornberg, 2006.]

2.2.4.4 Systemin toteuttaminen

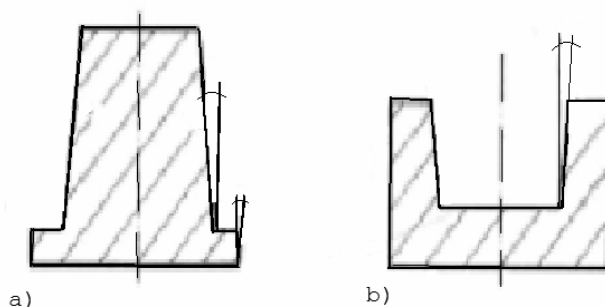
Kun konenäkösystemin määrittely ja suunnittelu on tehty, etenee projektin toteuttaminen tavallisesti seuraaviin vaiheisiin: laitteiden ja ohjelmistojen hankinta, kehittäminen, asennus, koeajot, hyväksymistestaus, koulutus ja dokumentointi. Laitteiston asennusvaiheessa systemi kootaan toimintaympäristöönsä ja siinä käytettävät ohjelmistot otetaan käyttöön. Samalla tarkistetaan systemin toimivuus esimerkiksi kameran laukaisun, kuvaamisen ja muiden perusrutiinien suhteen ja saadaan käsitys tuotantoprosessin vaikutuksista kuvaamiseen ja tarkkuuteen. Mahdollisesti tässä vaiheessa törmätään tuotantoympäristön vaikutuksiin, joita ei vielä aikaisemmin ole eritelty, esimerkkinä tärinä tai sähköiset häiriöt. Ennen jatkamista seuraaviin vaiheisiin, tulee esiin tulleet ongelmat ratkaista. Asennuksen jälkeen käytettävä ohjelmisto tulee testata ja optimoida, kunnes sille asetetut vaatimukset täyttyvät. Hyväksymistestauksen tehtävänä on todeta, että järjestelmä toimii vaatimusten mukaisesti. Projektin loppuunsaattamiseksi dokumentointi ja konenäkösystemin yksityiskohtainen kouluttaminen ovat välttämättömiä. Dokumentoinnin tulisi kattaa ainakin seuraavat kohdat: systemin erittely, systemin käsittely ja käyttö, laitteiston ja ohjelmiston käyttöohjeet, ylläpito, varaosalista ja suositus varastos-

sa säilytettävistä osista, kuten lampuista, mekaaniset piirustukset, piirikaavio sekä käytettävien laitteiden käyttöohjeet. [Hornberg, 2006.]

2.2.5. Muovituotteiden mittaamisen haasteet

Muovilaatuja ja muovituotteiden valmistusmenetelmiä kehitetään jatkuvasti. Samalla on syytä muistaa huomioida muovituotteiden mittatarkkuus ja se, että muovikappaleiden mittaamisen tarve kasvaa jatkuvasti. Kappaleiden dimensioiden mittaamiseen käytettäviä mittalaitteita on kahta päätyyppiä: koskettavia ja optisia. Molempia tyyppisiä voidaan käyttää muovikappaleiden mittaamiseen ja jotkut laitteet sisältävät molemmat menetelmät. Koskettavan mittalaitteen toiminta perustuu siihen, että kappaleen pintaa kosketetaan tietynlaisella kärjellä, jolloin laite mittaa kosketuskohdan koordinaatit. Kärkiyhdistelmiä on erilaisia, mutta hankaliin koloihin on vaikea päästä, eikä pieniä yksityiskohtia, kuten kulmia tai kaaria pystytä mittaamaan. Optiset mittalaitteet taas mittaavat kappaleen sitä koskettamatta kameran muodostaman kuvan perusteella. Optisten laitteiden haasteena on esimerkiksi erilaisten kulmien taakse näkeminen. [Tikka & Salmi, 2001.]

Muovista valmistettuja kappaleita mitattaessa on huomioitava, että tavallisesti ne ovat pehmeitä, joustavia ja kevyitä, joten koskettavaa laitetta käytettäessä koskettava voima ei saa olla liian suuri, sillä kappale ei saa liikkua eikä joustaa koskettavan voiman vaikutuksesta. Tästä syystä optinen mittaus on usein järkevin vaihtoehto muovikappaleiden mittaamiseen. Muovikappaleiden mittatarkkuus on usein huonompaa kuin esimerkiksi metallilla, mikä tulee huomioida mittauksia suunnitellessa. Muovituotteiden kohdalla mittausten tarkkuutta heikentävät myös erilaiset valmistustekniikasta johtuvat yksityiskohdat kappaleissa. Tällaisia piirteitä ovat esimerkiksi päästöt, eli tietyssä kulmassa kapenevat kappaleen seinämät, joiden tarkoituksena on helpottaa kappaleen poistamista muotista valmistusprosessissa (kuva 10). Myös se tosiasia, että tietyillä muovituotteiden valmistusmenetelmillä ei ole mahdollista saada aikaan optisen mittauslaitteen vaatimia selkeitä kulmia ja reunoja, asettaa haasteita muovituotteiden mittaamiseen optisesti, sillä pyöreiden reunojen mittaaminen on huomattavasti epätarkempaa kuin terävien. Lisäksi eriväristen kappaleiden mittaamiseksi joudutaan säätämään valaistusta. [Tikka & Salmi, 2001.] Myös kappaleen etäisyys valaistuskomponentista vaikuttaa tunnistettavan reunan sijaintiin ja näin ollen myös mittaustuloksiin, sillä jos mitattava kappale on kaukana kollimoidun (yhdensuuntaisen) vastavalon lähteestä, eivät valon suunta ja voimakkuus välttämättä ole samat kuin kappaleen ollessa lähellä valon lähdettä. Optiset mittausmenetelmät perustuvat valaistuksen avulla aikaansaatuihin kontrastieroihin mitattavassa kappaleessa. Kuitenkin nämä kontrastierot voivat vaihdella esimerkiksi pinnan karheudesta ja pyöristyksistä riippuen, mikä vaikuttaa myös oleellisesti mittaustarkkuuteen. [Kiviö, Salmi & Tikka, 2002.]



Kuva 10. Kappaleen muotista irrottamista helpottavat päästöt a) positiivimuotissa b) negatiivimuotissa [Illig, 2001].

Ideaalitulanteessa mittauksessa kappale makaa vapaana pinnalla, jolta se mitataan. Kuitenkin mittauslaitteen liikkeet tai mittausvoimat vaativat kiinnittämistä, erityisesti kevyillä materiaaleilla, kuten muovit. Mitattavat kappaleet tulee siis kiinnittää mittausalustansa ennen mittaamista niiden paikallaan pysymisen takaamiseksi. Kappaleita kiinnittäessä tulee huomioida, ettei kiinnityssysteemi häiritse mittaamista esimerkiksi muuttamalla kappaleen muotoa tai mittoja. Kappaleen ollessa pehmeä ja joustava, se voi taipua jo pelkästä omasta painostaan, jolloin kiinnitin voi toimia myös kappaleen tukena. Parhaita kiinnityspintoja ovat jäykät, muodoiltaan virheettömät, toisiaan vastaan kohtisuorassa sijaitsevat tasot, jotka takaavat yksiselitteisen asennon ja paikan. Huonoimman kiinnityksen asennon kannalta tarjoaa kaksoiskaareva pinta, kuten esimerkiksi pallo. Erilaisia kiinnityssysteemejä ovat esimerkiksi erilaiset tarrat, imukupit, magneetit sekä muotovasteet. [Tikka & Salmi, 2001.]

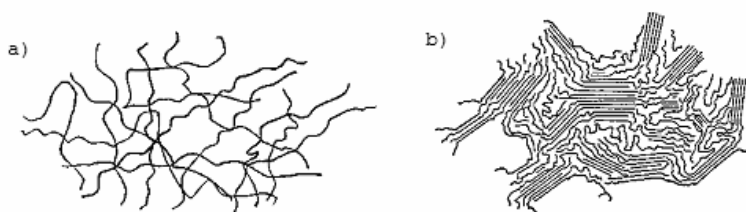
Vaikka mittaaminen ei suoranaisesti paranna mitattavan tuotteen laatua, se tuottaa validia tietoa, jota voidaan hyödyntää tuote- ja muottisuunnittelussa sekä muotin ja muovituotteen valmistusprosessissa. Tehtävät mittaukset kannattaa kohdistaa oikea-alaisesti oleellisiin kohteisiin, eli muotteihin, tuotteisiin sekä niissä oleviin kriittisiin piirteisiin. Yleisesti ottaen muovituotteet ovat ominaispiirteiltään vaikeasti mitattavia. Lisää haastetta mittauksiin tuo sarjatuotanto, jolloin mittauksen pitäisi olla nopeita ja kuitenkin luotettavia. Mittauksen suunnittelun tärkeimmät osa-alueet ovat: mitä mitataan, miten mitataan, milloin mitataan sekä miten saatuja tuloksia hyödynnetään. [Kiviö, Salmi & Tikka, 2002.]

2.3. Muovituotteiden kutistumiskäyttäytyminen lämpömuovausprosessissa

2.3.1. Kestomuovit - polypropeeni

Kestomuovit koostuvat makromolekyyleistä, eli pitkistä polymeeriketjuista, jotka sitoutuvat toisiinsa heikoilla sidoksilla. Nämä ketjut voivat olla joko lineaarisia tai haaroittuneita. Kun nämä molekyylit ovat täysin järjestäytymättömiä, on kyseessä amorfinen

kestomuovi (kuva 11 a)). Säännöllisesti järjestäytyneet molekyylit sen sijaan voivat muodostaa kiteitä. Muovit eivät kuitenkaan koskaan kiteydy kauttaaltaan, joten yleisesti puhutaan osakiteisistä kestopuoveista (kuva 11 b)). Lämmitettäessä kestopuovia polymeeriketjujen väliset sidokset heikkenevät ja polymeeriketjut pääsevät liukumaan toistensa lomitse rakenteen kuitenkin rikkoutumatta, mikä mahdollistaa kestopuovien uudelleen muotoilemisen lämmön avulla esimerkiksi ruiskuvalulla, ekstruusiolla, lämpömuovauksella ja puhallusmuovauksella. [Illig, 2001.]



Kuva 11: a) amorfisen ja b) osakiteisen muovin rakenne [Shrinkage in plastic processing, 2007].

Amorfiset kestopuovit eivät siis kiteydy epäsymmetrisen rakenteensa ja suurien sivuryhmiensä ansiosta lainkaan, ja ovatkin värjäämättöminä kirkkaita. Osakiteiset kestopuovit taas sisältävät erillisiä järjestäytyneitä molekyylialueita, eli kitealueita. Kiteisyysden vuoksi ne ovat usein sameita ja kiteisyysasteen kasvaessa läpinäkyvyys heikkenee. Kun osakiteistä muovikalvoa lämmitetään kiteiden sulamisalueen yläpuolelle, kalvo kirkastuu koska kiteiden sulaessa siitä tulee amorfinen. Muovin jäähtyessä kiteet muodostuvat kuitenkin uudelleen ja muovi samenee. Kiteytymistä on kuitenkin mahdollista estää nopealla jäähtytyksellä, jolloin saadaan muovi pysymään kirkkaana. [Illig, 2001.]

Amorfiset kestopuovit muuttuvat muovattaviksi, eli pehmenevät kun niitä lämmitetään lasinsiirtymälämpötilan (T_g) yläpuolelle. Osakiteiset kestopuovit vaativat muovaamiseen lämpötilan, jossa kiteet sulavat. Jos kiteisyysaste on pieni, eli kiteitä on vähän, riittää vähäinen sulamislämpötilan (T_m) ylittäminen, mutta kiteisyysasteen ollessa suuri, täytyy sulamislämpötila ylittää reilusti, jotta kaikki kiteet varmasti sulaisivat. Jos osakiteisestä muovista halutaan valmistaa lämpömuovaamalla tuote, jonka käyttölämpötila tulee olemaan korkea, tai jota tulee voida steriloida kuumassa, kannattaa tuote valmistaa tavallista korkeammassa lämpötilassa, jolloin tuote tulee kestävämpään käyttöaikanaankin paremmin korkeita lämpötiloja. [Illig, 2001.]

Polypropeeni

Polypropeeni on polyolefiineihin kuuluva propeenimonomeereistä rakentuva osakiteinen kestopuovi, joka rakenteensa perusteella voidaan jakaa kolmeen ryhmään: homopolymeerit, blokkikopolymeerit ja randomkopolymeerit. Homopolymeerit ovat suhteellisen läpikuultavia ja hauraita matalissa lämpötiloissa. Kopolymeerit ovat luonnonväri-

senä opaaleja ja sitkeämpiä kuin homopolymeerit, mutta myös vähemmän jäykkiä. Satunnaiskopolymeerit ovat vieläkin taipuisampia kuin kopolymeerit, mutta luonnonvärisinä jopa paremmin läpinäkyviä kuin homopolymeerit. [Pajunen, 2006.]

Polypropeenin voidaan valmistaa stereospesifisellä polymeraatiolla, jossa käytetään matalaa painetta ja Ziegler-Natta katalyyttiä, jonka valinnalla voidaan vaikuttaa siihen, onko polypropeeni isotaktista, sydiotaktista, ataktista vai näiden yhdistelmää. Useimmat kaupalliset laadut ovat pääasiassa isotaktisia. Metyyliryhmien sijaitessa toisella puolella polymeeriketjua, eli kun on kyseessä isotaktinen molekyyli, on molekyyleillä taipumus kiertyä kierremäiseen muotoon. Nämä kiertet muodostavat rivin toinen toisensa viereen synnyttääkseen kiteitä, joista kaupallisen polypropeenin lujuus johtuu. Syndiotaktisessa muodossa metyyliryhmät ovat vuorotellen ketjun eri puolilla ja ataktisessa satunnaisesti ketjun eri puolilla. Kaupallinen polypropeeni on useimmiten sekoitus eri konformaatorakenteita omaavia molekyyliketjuja, joiden keskinäinen suhde määräytyy polymeraatioprosessissa. Isotaktinen polypropeeni, jossa on minimimäärä (5-20 %) ataktista rakennetta on paras muoto käytännön sovelluksiin. Prosessoinnin aikana kohoetussa lämpötilassa isotaktinen polypropeeni kiteytyy, jolloin sen hyvät ominaisuudet lisääntyvät. [Valuatlas, 2009.]

Polypropeenin ominaisuudet riippuvat sen sulaindeksistä, moolimassasta, moolimassajakaumasta, käytetystä komonomeeristä (esimerkiksi eteeni tai buteeni), kiteisyydestä ja taktisuudesta, sekä käytetyistä lisäaineista. Moolimassa ja -jakauma määräävät muovin sulavirtausominaisuudet työstössä. [Hidén, 2001.] Sulaindeksiluku kuvaa sulan juoksevuutta ja kertoo moolimassan suuruusluokan. Se on reologisista, eli virtausteknisistä ominaisuuksista tärkein ja määräävin suure. Sulaindeksi ja moolimassajakauma määräävät tuotteen sulavirtausominaisuudet työstössä, kertoen muovauksen helppoudesta ja valmistetun tuotteen lujuudesta. Sulaindeksiluvun kasvaessa jäykkyys vähenee. [Pajunen, 2006.] Polypropeenin moolimassa vaihtelee 80 000 - 200 000 g/mol välillä. [Valuatlas, 2009]. Moolimassajakauma vaihtelee melko kapealla alueella ja jakauman leveys riippuu käytetystä katalyytistä, prosessista ja jälkikäsittelystä, jonka avulla moolimassajakaumaa voidaan haluttaessa kaventaa [Hidén, 2001].

Polypropeenin kiteisyysaste on matalatiheyksisen polyeteenin (LDPE) ja korkeatiheyksisen polyeteenin (HDPE) välillä. Polypropeenin kiteytymistä helpottavat molekyyliarakenteen symmetrisyys, moolimassan kasvu tiettyyn rajaan saakka sekä hidas jäähtyminen ja orientoituminen. Kiteisyyttä taas alentavat mm. kopolymerointi, pehmittimet, silloittuminen, seosaineet, polymeerin haaroittunut ketjurakenne, prosessoinnin apuaineet, lujitteet, väriaineet sekä stabilisaattorit. Kiteisyyden kasvaessa sulamislämpötila nousee, vetolujuus, jäykkyys ja kovuus kasvavat ja kemikaalien kestävyys paranee. Samalla kaasujen ja vesihöyryjen läpäisevyys heikkenee, kutistuminen kasvaa, tiheys kasvaa, jännityssäröily lisääntyy ja iskusitkeys ja läpinäkyvyys heikkenevät. Kiteisyyden määrä

riippuu lähinnä isotaktisen polymeerin määrästä, mutta myös molekyylien koko vaikuttaa kiteisyyteen, sillä molekyylien kasvaessa kiteytyminen vaikeutuu. [Hidén, 2001.]

Ominaisuuksiltaan polypropeeni on melko lähellä polyeteeniä. Polypropeenin mekaaniset ominaisuudet ja lämmönkesto ovat kuitenkin hieman parempia, joten se soveltuu paremmin jäykällä pakkauksilla elintarvikealan pakkausmateriaaliksi [Valuatlas, 2009]. Sen kulumiskestävyys on hyvä, kitka alhainen ja prosessoitavuus kohtalaista. Polypropeeni kestää hyvin jännityssäröilyä, ja sen ominaisuudet tekevät siitä ensiluokaisen pakkausmateriaalin elintarviketeollisuuden käyttöön. Kuitenkin sen onnistunut lämpömuovaus on riippuvainen eräiden materiaaliin liittyvien ongelmien ratkaisemisesta. Esimerkiksi sulan polypropeenin alhainen lujuus saattaa johtaa valumajälkien syntyyn sekä epätasaiseen paksuusprofiiliin lämpömuovauksessa. Prosessointi-ikkunaa pienentää kapea käytettävissä oleva lämpötila-alue ja lisäksi polypropeenilla on huono lämmön vastaanotto- ja luovutuskyky. [Pajunen, 2006.]

Polypropeenin kemiallinen kestävyys on hyvä ja se on myös myrkytön ja sopii näin ollen elintarviketeollisuuden sovelluksiin. Polypropeenista voidaan valmistaa tuotteita, jotka ovat steriloitavissa höyryllä. Tämä on etu varsinkin lääkinnällisten välineiden kohdalla. [Valuatlas, 2009.] Polypropeeni kestää alkoholeja, heikkoja orgaanisia happoja ja emäksisiä liuoksia, orgaanisten suolojen vesiliuoksia sekä pesuvaahoja 100 °C:een asti. Se ei kestä vahvoja hapettimia eikä halogenisoituja hiilihydraatteja ja se turpoo petrolissa ja bentseenissä. [Illig, 2001.] Jatkuva altistuminen hapettimille yli 60 °C lämpötilassa hajottaa polypropeenin. Orgaanisten liuottimien vaikutuksesta polypropeeni tavallisesti turpoo hieman huoneenlämpötilassa. Yli 100 °C lämpötilassa se liukenee aromaattisiin hiilivetyihin, kuten bentseeniin ja tolueeniin. Polypropeenilla on pieni veden absorptio, mutta polymeeriketjussa olevien tertiääristen hiilien vuoksi se on herkkä hapelle, erityisesti korotetuissa lämpötiloissa. Polypropeenilla on polyeteeniä voimakkaampi vanhenemistaipumus, jonka vuoksi on käytettävä stabilisaattoreita lisäaineina. [Valuatlas, 2009.] Vesihöyryn läpäisevyys on hyvin heikko, mutta muita kaasuja polypropeeni läpäisee melko hyvin. Lämpölaajenemista polypropeenilla tapahtuu suhteellisen paljon, mikä aiheuttaa voimakasta muodonmuutosta. Tämä vaikutus ei kuitenkaan ole merkityksellinen täytetyillä materiaaleilla. [Illig, 2001.]

Polypropeenia voidaan prosessoida mm. ruiskuvalulla, ekstruusiolla, puhallusmuovauksella, tyhjiövalulla sekä rotaatiovalulla. Sitä voidaan myös porata, hitsata ja sorvata sekä käyttää täytettynä tai komposiittina. Polypropeenia voidaan myös muunnella esimerkiksi solustamalla, kopolymeroimalla, seostamalla ja lujittamalla. Lasikuitulujitettuna polypropeenilla on parempi mittapysyvyys, vääntyilykestävyys, jäykkyys sekä lujuus. Myös muita aineita voidaan käyttää parantamaan ominaisuuksia. Käyttökohteita ovat mm. lääketieteen tarvikkeet, elintarvikepakkaukset, kosmetiikka, kotitaloustuotteet, lautaset, putket sekä kemian ja sähköteollisuuden tarvikkeet. [Valuatlas, 2009.] Käyttömäärältään polypropeeni on polyeteenin (PE) ja polyvinyylikloridin (PVC) jälkeen kolman-

neksi käytetyin. Polypropeenimuoveja ei käytetä lainkaan ilman lisäaineita, sillä niihin lisätään aina mm. hapettumisen estoaineita polymeeriketjujen katkeamisen estämiseksi sekä mekaanisten ominaisuuksien säilyttämiseksi. Elintarviketeollisuuteen soveltuvien polypropeenilaatujen lisäainekoostumus on kuitenkin tarkoin määritelty ja suhteellisen vähäinen. [Pajunen, 2006.]

2.3.2. Lämpömuovaus ja ekstruusio

Lämpömuovauksella tarkoitetaan kestopuovien uudelleen muotoilua kohotetussa lämpötilassa muottien ja ali- tai ylipaineen avulla. Lämpömuovausta käytetään kestopuovi-tuotteiden valmistusprosessina enemmän kuin muutama vuosikymmen sitten ajateltiin olevan edes mahdollista. Nykyään lämpömuovaus voidaan lukea kuitenkin korkean teknologian valmistusmenetelmäksi. Sarjakoot voivat vaihdella kymmenistä kappaleista satoihin tuhansiin tuotteista riippuen. Pakkausteollisuudessa lämpömuovaus on usein vailla kilpailua mm. edullisuutensa vuoksi. Lämpömuovaamalla voidaan prosessoida perinteisten materiaalien lisäksi myös monikerroksisia, vaahtomaisia tai esipainettuja materiaaleja. Prosessi on suhteellisen nopea ja sillä valmistettavat kappalemäärät vaihtelevat muutamista kappaleista satoihin tuhansiin, ja myös valmistettavien kappaleiden koot voivat vaihdella huomattavasti. Raaka-ainepaksuudet voivat vaihdella välillä 0,05 – 15 mm, vaahtomaisilla raaka-aineilla jopa 60 mm asti. Lähes kaikki kestopuovit ovat lämpömuovattavissa. [Sandell, 2002.]

Edut ja ongelmat

Lämpömuovauksen etuja muihin kestopuovien prosessointimenetelmiin, kuten ruiskuvaluun ja puhallusmuovaukseen, verrattuna ovat esimerkiksi matalammat muovauspaineet, mahdollisuus monikerrosrakenteiden valmistamiseen sekä suhteellisen suurien kappaleiden valmistettavuus [A guide to thermoform processing of polypropylene, 2010]. Lämpömuovaamalla saadaan valmistettua myös hyvin ohutseinämäisiä kappaleita korkean sulaviskositeetin materiaaleja käyttämällä, mikä ei esimerkiksi ruiskuvalutekniikalla olisi mahdollista. Lämpömuovauksen huomattava etu on myös sen edullisuus, sillä lämpömuovauksessa käytettävät muotit, työkalut ja koneet ovat tavallisesti suhteellisen edullisia. Edullisuutena vuoksi lämpömuovausta käytetään erityisesti pakkausteollisuudessa enemmän kuin kilpailevia prosesseja. Tulevaisuutta ajatellen lämpömuovauksella näyttäisi olevan suuri potentiaali kehittyä yhä merkittävämmäksi muovien prosessointimenetelmäksi. Erityisesti tekniset tuotteet ja pakkausteollisuus ovat merkittäviä lämpömuovauksen käyttöalueita. [Illig, 2001.]

Lämpömuovauksessa jatkuvasti kehitystä vaativia asioita ovat esimerkiksi muovattavan levyn laatu, muovattujen kappaleiden seinämäpaksuuksien hallinta, kierrätysmateriaalin käyttö sekä kappaleiden yhdenmukaisuus ja mittapysyvyys [A guide to thermoform processing of polypropylene, 2010]. Lämpömuovatuilta kappaleilta puuttuu mittasuhteiden tarkkuus muihin prosesseihin, kuten ruiskuvaluun, verrattuna. Lämpömuovauksessa käytettävän suhteellisen matalan muovauspaineen vuoksi kalvon muovautumisaste

pienenee. Lisäksi muovattavat kalvot voivat vaihdella paksuudeltaan ja huokoisuudeltaan, mikä vaikuttaa myös muovaustarkkuuteen. Tarkkuuteen vaikuttaa myös se, että perinteisessä lämpömuovauksessa muovaus on yksipuoleista, eli muotin piirteet saadaan kopioitua tarkasti vain tuotteen toiselle pinnalle. Vain toinen levyn pinnoista on siis muottia vasten ja muotoutuu tarkasti kopioimaan muotin pintaa. Tällöin toinen puoli, joka ei ole kosketuksissa muotin kanssa, ei ole kovinkaan tarkka. [Rosato & al., 2001.] Lisäksi kilpaileviin muovituotteiden prosesseihin verrattuna lämpömuovauksessa aiheutuu lisäkustannuksia siitä, että lämpömuovattava muovilevy on ensin valmistettava ekstruusiolla, kun taas esimerkiksi ruiskuvalussa tuote voidaan valmistaa suoraan sulatetusta muovigranulaateista ilman välivaihetta [Illig, 2001].

Prosessissa syntyy suhteellisen paljon jätemuovia, esimerkiksi kun ekstruusion jälkeen levyä rullattaessa sen paksummat reunaosat leikataan pois. Lisäksi levystä kaikki ne osat, jotka jäävät muotin tai muottipesien ulkopuolelle, päätyvät jätemuoviksi. Nykyään on kuitenkin varsin tavallista, että jätemuovi kierrätetään rouhimalla se ekstruusioprosessin neitseellisen materiaalin sekaan ja prosessoimalla uudelleen. [Illig, 2001.] Kuitenkin suuri kierrätysaste ja kierrätetyn materiaalin suuri osuus heikentävät joitain materiaalin ominaisuuksia. Tämä johtuu mm. siitä, että lämpö ja leikkaus rouhimisvaiheessa, ekstruusiassa ja jossain määrin myös lämpömuovauksessa hajottavat termomekaanisesti useimpia polymeerejä. Tyypillinen mekaaninen vaikutus on molekyyliketjujen katkeaminen, jonka seurauksena murtolujuus, murtovenymä, sitkeys ja iskulujuus pienenevät. Tiettyjä lisäaineita, kuten pehmittimiä ja palonestoaineita, sisältävien polymeerien ominaisuudet heikkenevät kierrätettäessä huomattavasti merkittävämmiin. Tavallisesti raaka-aineen termomekaaninen huononeminen ei kuitenkaan ole kovin vaarallista, sillä pienet muutokset fysikaalisissa ominaisuuksissa eivät aiheuta suuria muutoksia prosessointiolosuhteissa. Myös lopulliset käyttöominaisuudet pysyvät melko muuttumattomina. Joka tapauksessa useaan kertaan kierrätetyn muovin mekaaniset ominaisuudet ovat heikentyneet verrattuna neitseelliseen raaka-aineeseen, jolloin kierrätystä on säädeltävä ja rajoitettava jonkun verran. Uudelleenkäyttöaste vaikuttaa myös muovin kutistumisominaisuuksiin esimerkiksi molekyyliketjujen katkeamisen myötä. [Sandell, 2002.] Prosessissa syntyvän jättemateriaalin kierrätys on noussut merkittäväksi osaksi lämpömuovausprosessin suunnittelua. Kierrätettäessä muovimateriaalia on osattava laskea kierrätysmateriaalin osuudet tarkasti, jotta ominaisuudet eivät heikkenisi liikaa. [Illig, 2001.]

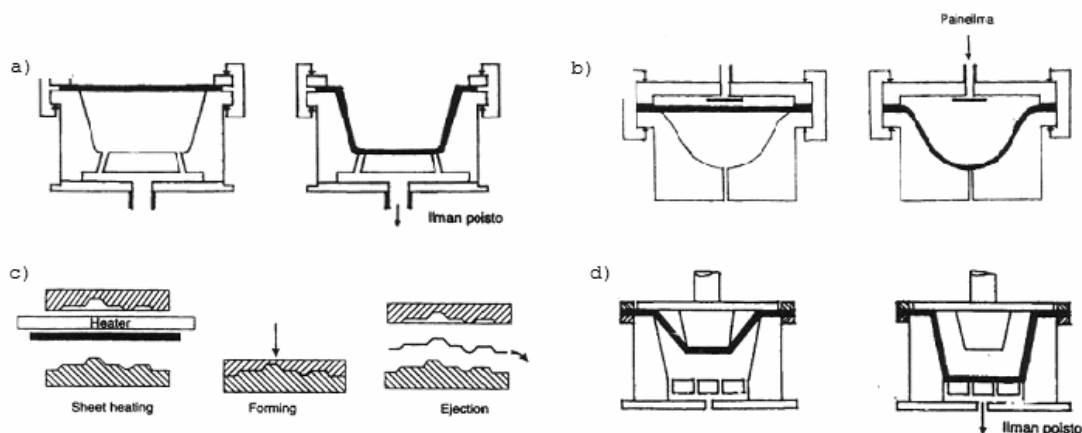
Ekstruusioprosessi

Koska lämpömuovausprosessissa muovattava materiaali on levynä tai kalvona, on hyvä tutustua hieman kalvonvalmistuksen, eli ekstruusioprosessin perusasioihin. Olennaiset askeleet kestopuovisten lämpömuovattavien materiaalien valmistamisessa ovat polymeerien valmistaminen ja niiden seostaminen ekstrudoitaviksi materiaaleiksi, kuten granulaateiksi, sekä näiden materiaalien prosessointi muovilevyiksi, joiden paksuus on 0,5 – 15 mm. Seostamisvaiheessa mm. pigmentit, lisä- ja apuaineet, antistaatit ja lujit-

teet sekoitetaan polymeerimateriaalin joukkoon. Hygroσκοoppisten, eli kosteutta itseensä keräävien muovien kohdalla vaaditaan tarkkaa materiaalin kuivattamista, sillä muovin imeytynyt kosteus voi aiheuttaa muoviin kuplia, sameutta ja mekaanisten ominaisuuksien heikkenemistä. Ekstruusioprosessin alussa seostetut ja kuivatut muovigranulaatit lisätään syöttösuppilon kautta ekstruuderin sylinteriin, jossa tasaisesti pyörivä ruuvi kuljettaa niitä eteenpäin. Samalla granulaatit sulavat lämmön ja kitkan vaikutuksesta tasaiseksi, homogeeniseksi massaksi. Massa kulkeutuu rakosuulakkeelle, josta se puristuu ulos levynä, jota vedetään erikokoisten kuljetintelojen kautta rullalle. Kuroman vuoksi kalvon reunat jäävät muita osia vahvemmiksi ja ne leikataankin pois ennen rullaamista. Kalvon paksuuteen voidaan vaikuttaa suutinrakoa säätelemällä lämpöruuvien avulla tai jäähdytystelojen väliä säätämällä. Tasokalvoja voidaan myös orientoida venyttämällä kalvoa sulamislämpötilan alapuolella halutussa suunnassa, jolloin lujuus kasvaa venytyksen suunnassa. Jonkinasteista orientaatiota voi tapahtua tahattomastikin kalvoa ekstruuderista rullalle vedettäessä. [Illig, 2001.] Ekstrudoimalla on mahdollista valmistaa sekä yksi- että monikerroskalvoja. Koekstruusio on menetelmä, jota käytetään kun yksittäisestä materiaalista valmistettu kalvo ei täytä laatuvaatimuksia tai kun halutaan pienentää kustannuksia sijoittamalla edullisempaa materiaalia kalvon sisäosiin. Tällöin muovikalvo valmistetaan useista eri kerroksista, jotka voivat olla keskenään samaa tai eri materiaalia. Monikerroskalvoja valmistettaessa jokainen materiaali plastisoidaan erillisessä ekstruuderissa ja muovisulat johdetaan omia kanaviaan pitkin koekstruusiosuuttimeen, jossa ne yhdistetään ja johdetaan ulos suuttimesta. [Hidén, 2001.] Ekstruusioprosessissa piilee joitain sudenkuoppia, jotka voivat aiheuttaa ongelmia lämpömuovausprosessissa. Tällaisia voivat olla esimerkiksi ekstruusiolla valmistetun levyn paksuuden vaihtelut, liian suuri orientaatio johtuen levyn liian suuresta vetonopeudesta, levyn roikkuminen kuumennuksen aikana johtuen liian alhaisista sisäisistä jännityksistä (sekä myös lämpölaajenemisesta) sekä erilaiset pintavirheet johtuen esimerkiksi likaantumisen tai muovimateriaalin kosteudesta. Tasokalvon valmistusmenetelmää, jossa valmistettu muovikalvo kelataan rullaksi ja varastoidaan odottamaan jatkokäsittelyä, kutsutaan off-line-menetelmäksi. In-line-menetelmässä valmis muovikalvo johdetaan suoraan lämpömuovauskoneeseen, eikä sitä kelata rullaksi. Monet yritykset ostavat muualla ekstrudoitua muovikalvoa varastoon ja ovat riippuvaisia kalvon valmistajasta. Laadun takaamiseksi tarvitaan yhteiset standardit ja pelisäännöt. [Illig, 2001.] Muutokset ekstruusion nopeudessa, suunnassa, lämpötilassa tai levyn mitoissa aiheuttavat muutoksia jännitykseen ja orientaatioon, joka levyssä on sitä muovattaessa. Levyn orientaatio ja sisäiset jännitykset voivat muuttaa muovin muovautumisominaisuuksia ja vaikuttavat mm. kappaleiden mittoihin ja yhdenmukaisuuteen. [Plastic thermoform design guidelines, 2000 - 2011.] Lämpömuovausprosessissa muovattavat levyt tai kalvot voivat olla yksittäisiä muovilevyjä tai jatkuvaa kalvoa, joka syötetään prosessiin rullalta. Suuremmat kappaleet ja paksummat levyt ovat usein yksittäisiä ja pienemmät kappaleet ja ohuimmat kalvot valmistetaan tavallisesti jatkuvana systeeminä. [A guide to thermoform processing of polypropylene, 2010.]

Lämpömuovausprosessi

Lämpömuovausprosessissa ekstruusiolla valmistettu termoplastinen tasokalvo kuumennetaan lasinsiirtymä- (amorfiset muovit) tai sulamislämpötilan (osakiteiset muovit) yläpuolelle taipuisaan tilaan. Tämän jälkeen kalvo työstetään mukaiseen muotoon. [Hidén, 2001.] Lämpömuovaus tapahtuu joko alipaineen, ylipaineen, kahden muotin, aputapin tai näiden yhdistelmän avulla kalvon saavuttaessa oikean lämpötilan (kuva 12) [A guide to thermoform processing of polypropylene, 2010]. Alipainemuovauksessa kalvo lämmitetään ja muotoillaan imemällä alipaine kalvon ja muotin väliin, jolloin muovikalvo puristuu muotin pintoja vasten. Yliainemuovauksessa taas lämmitettyyn muovikalvoon kohdistuu ylipaine, jolloin kalvo painautuu muotin pintaa vasten. Kalvo voidaan myös puristaa muotoonsa ilman yli- tai alipainetta kahden muotin osan avulla. Esimerkiksi onttoja kappaleita taas saadaan, kun kaksi lämmitettyä, päällekkäin olevaa kalvoa laitetään kaksipuolisen muotin sisään ja kalvot puristetaan päistään kiinni ja niiden väliin johdetaan paisutusputken kautta paineilmaa, joka pakottaa kalvot painautumaan muotin sisäpintoja vasten. [Hidén, 2001.]



Kuva 12: Lämpömuovaus a) alipaineella, b) ylipaineella, c) kahdella muotilla ja d) aputapilla [Pajunen, 2006].

Lämpömuovausprosessi voidaan jakaa kahteen vaiheeseen: esivenytykseen ja varsinaiseen muovausprosessiin. Suuret ja profiililtaan syvät kappaleet muovataan tavallisesti esivenytystä käyttäen tasaisen materiaali-jakauman saavuttamiseksi kappaleessa. Aputapilla (*plug assist*) muovaaminen johtaa parhaisiin tuloksiin pienten, syvien ja tarkkaan määriteltyjen kappaleiden kohdalla. Aputapit ovat mekaanisia muotoja, joita käytetään työntämään pehmeä muovimateriaali tasaisesti syvään muottionkaloon. [A guide to thermoform processing of polypropylene, 2010.] Esivenytys voidaan tehdä mekaanisesti itsensä muotin tai aputapin avulla, pneumaattisesti käyttäen ali- tai ylipainetta, sekä mekaanisen ja pneumaattisen systeemin yhdistelmänä. Esivenytyksen tavoitteena on saada aikaan aihio, josta saadaan varsinaisella muovausprosessilla muovattua kappale, jolla on tasainen ja optimaalinen seinämänpaksuusjakauma. Menetelmää kutsutaan myös syvävedoksi. [Illig, 2001.]

Varsinaisessa muovausvaiheessa mahdollisesti esivenytetty aihio muovataan muotin muotoon riittävän korkeassa lämpötilassa. Tyypillinen lämpömuovausprosessi sisältää seuraavat vaiheet: muovattavan muovikalvon kiinnitys, kuumennus ja muovaus, sekä valmiin kappaleen jäähdytys, leikkaus ja viimeistely. Myös esilämmitys voi varsinkin off-line-lämpömuovauksessa ja paksujen materiaalien kanssa olla tarpeen. Lämpömuovausprosessia kuvaavista termeistä muovausalueella tarkoitetaan kiinnityskehyksen sisämittojen muodostamaa pinta-alaa, syöttöalueella aluetta, jolla tapahtuu venymistä, ja kiinnityslaipalla aluetta, josta raaka-aine kiinnitetään kiinnityskehykseen. [Sandell, 2002.]

Kun lämpömuovausprosessissa muovilevyä lämmitetään ennen varsinaista muovausta tai varsinaisen muovauksen yhteydessä, riippuu muovin käyttäytyminen lämmitysvaiheen aikana muovilajista ja levyn paksuudesta. Yleisesti ottaen muovit ovat huonoja lämmönjohteita, joten lämmitysaika kasvaa materiaalin paksutessa. Paras lämmitystulos saadaan, kun levyn molempia pintoja lämmitetään samanaikaisesti. Oikea muovauslämpötila on helpointa löytää yrityksen ja erehdyksen kautta: jos lämpötila on liian matala, levy ei muovaudu tyydyttävästi ja lämpötilan ollessa liian korkea kappaleen laatu ja mekaaniset ominaisuudet kärsivät. Muovauslämpötila-alue on alimman lämpötilan, jossa materiaali voidaan muovata riittävällä tarkkuudella, ja korkeimman lämpötilan, jossa materiaali on muovattavissa eikä vahingoitu termisesti, välinen alue. Päättävöitteena on saada aikaan tasainen lämpötila koko muovausalueen yli, mikä onnistuu parhaiten hitaalla kuumentamisella. Jokaisella kestumuovilla on ominainen lämpötila-alueensa, jolla sitä voidaan venyttää paljon suhteellisen pienellä voimalla. Lämpömuovattavan materiaalin kuumentaminen lämpömuovauksessa tapahtuu joko kontaktilämmityksellä, säteilyllä tai johtumalla. [Illig, 2001.] Polypropeenin kohdalla vaaditaan laitteistolta hyvin varovaista lämmitystä ja lämmön kontrollia kalvossa. Syynä tähän on polypropeenille ominainen kapea lämpötila-alue, jolla lämpömuovaus on mahdollista. [Rosen, 2002.]

Jäähtyminen alkaa, kun lämmönlähde poistuu muovattavan materiaalin läheisyydestä tai kun materiaali siirtyy lämmitysasemalta. Kuitenkin materiaalilla täytyy olla tietty lämpötila itse muovaamisen alkaessa, jotta muovaaminen voisi onnistua. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että aikavälin lämmityksen lopettamisesta muovaamisen aloittamiseen täytyy olla mahdollisimman lyhyt. Mitä pidempi tämä aikaväli on, sen kuumempi täytyy materiaalin olla lämmitysvaiheen jälkeen. Jotkut muovit kuitenkin vahingoittuvat herkästi liian kuumassa, eivätkä enää muovaudu normaalisti. Lämpölähteiden poistamisen tulee siis tapahtua mahdollisimman nopeasti ja myös levyn kuljettaminen muovausasemalle tulee olla nopeaa. Varsinaisen muovausvaiheen alussa (esivenytys/-muovaus) jäähtyminen alkaa säteilyn, johtumisen sekä osittain myös materiaalin ja esivenytystyökalun välisen kontaktin kautta. Heti, kun muovaaminen ali- tai ylipaineella alkaa, on jäähtyminen voimakasta, johtuen materiaalin kontaktista jäähdytettyyn muottiin. Muotitkontaktin lisääntyessä, jäähtyminen kiihtyy entisestään. Ohuen seinämäpaksuuden kappaleilla jäähtymisjakso kestää vain muutaman kymmenesosa sekunnin, kun taas

paksummilla muutamia sekunteja kauemmin. Jakson aikana kalvon tulee kuitenkin pysyä riittävän lämpimänä hyvän muovautumisen takaamiseksi. Varsinainen jäähtymisaika alkaa vasta muovaamisen loputtua. Lämpömuovauksessa jäähtymisaika on riippuvainen mm. muovilaadusta. Tämä johtuu eri muovien erilaisista ominaislämpökapasiteettien ja lämmönjohtavuuden arvoista. Myös tuotteen seinämäpaksuus venytyksen jälkeen vaikuttaa jäähtymisaikaan. Mitä ohuemmaksi materiaali muovauksessa venytetään, sitä lyhyempi jäähtymisaika luonnollisesti tarvitaan. Jäähtymisaika loppuu vasta, kun vähiten venynyt, eli paksuin osa kappaleesta on jäähtynyt riittävästi. Myös muovauksessa käytetty lämpötila vaikuttaa jäähtymisaikaan, koska mitä enemmän lämpöä täytyy kappaleesta poistaa, sitä pidempi on jäähtymisaika. Näiden lisäksi muotista irrottamislämpötila, muottimateriaali, muottilämpötila sekä muotin ja kappaleen välisen kontaktin intensiteetti vaikuttaa jäähtymisaikaan. Jäähtymisaikaa voidaan lyhentää jäähdyttämällä kappaletta ilmapirralla tai muulla väliaineella, sillä vaikka levyn jäähtyminen muotissa on tehokkainta sen ollessa kosketuksissa muotin kanssa, niin vielä tehokkaampaa se on kun levyn molemmat pinnat jäähtyvät samanaikaisesti esimerkiksi ilmapirran vaikutuksesta. [Illig, 2001.]

Lämpömuovausprosessin lopussa, kappaleen jäähdyttyä riittävästi, se poistetaan muotista. Tämä voidaan tehdä vasta, kun kappaleen paksuin osa on jäähtynyt riittävästi, sillä kappaleeseen tulee helposti muodonmuutoksia jos se on vielä lämmin muotista poistettaessa. Jos kappale taas on liian kylmä muotista poistettaessa, sykli aika pitenee tarpeettomasti. Varsinkin positiivimuoteissa jäähtymisaika kannattaa pitää mahdollisimman lyhyenä johtuen kappaleen kutistumisesta muotin päälle, mikä voi vaikeuttaa kappaleen irrottamista myöhemmin. Negatiivimuoteilla kutistuminen taas tapahtuu muotista pois päin, joten irrottaminen helpottuu kutistumisen myötä. Kappaleen muotista irrottamista helpottamaan on muotteihin suunniteltu kapenevat sivuseinämät, joiden kulmaa kappaleen ulostyöntösuunnassa kutsutaan päästöksi (kuva 10). Päästöt tulisi valita mahdollisimman suuriksi, sillä suuremmilla päästöillä ulostyöntö on nopeampaa ja syklin aika lyhyempi. Apuna muotista poistamisessa voidaan käyttää myös paineilmaa tai erilaisia mekaanisia apuvälineitä, kuten ulostyöntötappeja. [Illig, 2001.]

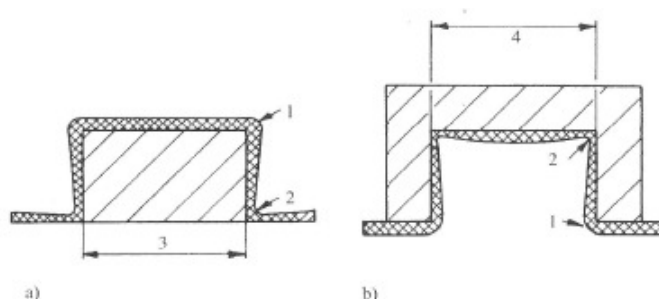
Suurin osa lämpömuovatuista kappaleista vaatii jonkun verran viimeistelyä. Teknisissä tuotteissa viimeistely voi kattaa jopa 80 % valmistuksen kokonaiskustannuksista. Merkittävimpiä jälkikäsittelyitä ovat esimerkiksi loveaminen, purseen/jäysteen poistaminen, jäykistäminen, erilaiset pintakäsittelyt, sekä liittäminen liimaamalla, hitsaamalla, tiivistämällä, pulittaamalla tai niittaamalla. [Illig, 2001.] Prosessin kehittyneissä muodoissa tuotteiden leikkaus, viimeistely ja pinoaminen tapahtuvat automatisoidusti samassa prosessissa, jolloin leikkauksen jälkeen tuotteet kulkeutuvat prosesseissa pinontalaitteelle, jossa tuotteet pinotaan halutun kokoisiin pinoihin ja edelleen pakkauspisteelle, painokoneelle tai muuhun jälkikäsittelyyn. Kalvorullasta jäävä jäteraina rullataan tai rouhitetaan uusiokäyttöä varten. [Pajunen, 2006.]

Lämpömuovauksessa prosessiparametrien valinnoilla voidaan vaikuttaa tuotteen ominaisuuksiin, kuten lujuuteen, sitkeyteen, pinta- ja diffuusio-ominaisuuksiin, muovautumistarkkuuteen ja lämpömuovauskestävyyteen. Muovautumistarkkuuteen ja lämpömuovauskestävyyteen voidaan vaikuttaa mm. tuotteen seinämäpaksuudella, johon eri paksuisten kohtien jäähtymiskäyttäytyminen ja paikalliset vaihtelut molekyyliketjujen orientaation relaksoitumisessa saavat aikaan eroja. Toisin kuin ruisku- ja puhallusmuovauksessa, lämpömuovauksessa voidaan säädellä tuotteiden seinämäpaksuuksia huomattavasti ilman muottijännityksiä. [Sandell, 2001.] Joidenkin kestopuovien, esimerkiksi polypropeenin, lämpömuovauksessa voidaan käyttää kahta tekniikkaa: kiinteän tilan painemuovaus sekä sulatilan lämpömuovaus. Kiinteän tilan painemuovaus ei vaadi muovikalvon kuumentamista sulamispisteeseen, vaan suuremman muovauspaineen käyttö mahdollistaa muovaamisen sulamispisteen alapuolella. Näin muovausprosessi aikaansaa molekyylien voimakkaampaa orientoitumista, jonka seurauksena kappaleen jäykkyys ja vetolujuus kasvavat. Tämä mahdollistaa seinämäpaksuudeltaan ohuempien ja suhteellisen kevyiden kappaleiden valmistamisen. Sulatilan lämpömuovaus taas tapahtuu sulamispisteen yläpuolella. Tämä voi joidenkin muovilaatujen kohdalla aiheuttaa ongelmia, kuten kalvon riippumista ja ohenemista, joten sulatilamuovaus edellyttää käytettävältä materiaalilta korkeaa sulalujuutta lepotilassa. Oikeanlaisella sulatilan lämpömuovauksella on kuitenkin merkittäviä etuja kiinteän tilan painemuovaukseen verrattuna: kun muovaukseen tarvitaan vähemmän painetta, voidaan muottisuunnittelua yksinkertaistaa ja muotin käyttöikä pitenee. Sulatilamuovauksella saadaan kappaleisiin tasaisemmat seinämäpaksuudet, jolloin myös laatu paranee. Muovattavan levyn kuumentaminen sulamispisteen yläpuolelle poistaa myös jännityksiä, joita levyyn on ekstruusion aikana muodostunut. Sitä vastoin kiinteän tilan muovaus lisää jännityksiä lopullisessa kappaleessa, ja nämä jännitykset aiheuttavat ongelmia esimerkiksi tuotteita uudelleen lämmitettäessä. Sulatilassa muovatut kappaleet kestävätkin korkeampia käyttölämpötiloja (esimerkiksi mikroaaltouunin kestävät muoviset astiat) kuin kiinteässä tilassa muovatut. [A guide to thermoform processing of polypropylene, 2010.]

Lämpömuovauslaitteisto ja muotit

Lämpömuovauskoneen muovausasema koostuu kahdesta pöydästä, jotka liikkuvat kohtisuorassa toisiaan kohtaan. Muovaustyökalu, eli muotti on asennettu toiseen pöydästä. Avustava työkalu mekaaniseen esivenytykseen tai esivenytystappi voi olla kiinnitettynä toiseen pöytään. Kumpikin pöytä on varustettu ali- tai ylipainekeytkennöillä. Monissa lämpömuovauskoneissa pöydät ovat keskenään identtisiä, mutta ne voivat olla myös erilailla rakennetut. Lämpömuovauksessa vain toinen puoli lämmitetystä materiaalista tulee kosketuksiin muotin kanssa. Tästä syystä vain tälle pinnalle saadaan kopioitua muotin yksityiskohdat. Riippuen siitä, kumpi puoli muovattavasta materiaalista tulee olemaan kontaktissa muotin kanssa, sanotaan prosessia positiivi- tai negatiivimuovaukseksi (kuva 13). Positiivimuovauksessa kappaleen sisäosa on tarkka kopio muotista ja kappaleen reunoilla on paksummat alueet ja keskellä ohuet. Nurkat jäävät nopean jäähtymisen vuoksi usein paksuiksi ja liian pieni päästö vaikeuttaa muotista irrottamista.

Negatiivimuovauksessa kappaleen ulko-osasta saadaan tarkka ja tuotteen ympärille muodostuu tasainen, paksu reunus ja nurkat muodostuvat ohuiksi. Negatiivimuotilla valmistetut kappaleet on tavallisesti helppo irrottaa muotista. Raaka-aineen venymisen vuoksi tuotteeseen syntyy erilainen seinämänpaksuuden jakautuma käytettävästä muotista riippuen. Positiivimuotit ovat tavallisesti edullisempia kuin negatiivimuotit. [Illig, 2001.]



Kuva 13. a) positiivimuotti ja b) negatiivimuotti. (1: Paksut kohdat 2: Ohuet kohdat 3&4: Lopullisen kappaleen mitat sisä- ja ulkopuolelta) [Illig, 2001].

Monipesämuotilla voidaan valmistaa useampia pieniä, ohutseinämäisiä kappaleita yhdellä iskulla, jolloin saadaan tuotettua suuria määriä tuotteita lyhyemmällä syklijajalla, esimerkiksi juuri pakkausteollisuuden tarpeisiin [A guide to thermoform processing of polypropylene, 2010].

2.3.3. Kutistumiskäyttäytyminen lämpömuovausprosessissa

2.3.3.1 Kutistuman määritelmä

Kuten muillakin materiaaleilla, myös muoveilla tilavuus kasvaa ja tiheys laskee lämpötilan noustessa, kun etäisyys molekyylien välillä kasvaa. Vastaavasti lämpötilan laskiessa tilavuus pienenee ja tiheys kasvaa. Tällaista tilavuuden muutosta jäähtymisen aikana muovauslämpötilasta huoneenlämpöön kutsutaan termiseksi kutistumiseksi, joka on pääasiassa polymeerimateriaaleille ominainen piirre. Kaikki polymeerit kutistuvat jäähtyessään, prosessista riippumatta. Kestomuovituotteiden kutistumalla tarkoitetaan muovikappaleessa lämpötilan vaikutuksesta tapahtuvaa dimensioiden muutosta, ilman mekaanisen jännityksen vaikutusta. Kutistuminen ei kuitenkaan läheskään aina tapahdu kerralla, silloin kun kappale jäähtyy, vaan voi jatkua vielä jäähtymisen jälkeen pitkiäkin aikoja, kuitenkin hidastuen ajan kuluessa. [Throne, 2008.] Lämpömuovausprosessissa muotti ja muovauksessa käytettävä yli- tai alipaine, voivat rajoittaa kutistumista. Kun kappale on poistettu muotista, sen dimensioiden voivat kuitenkin muuttua vapaasti. [Illig, 2001.] Kutistuminen ei siis ole yksittäinen tapahtuma, vaan tapahtuu ajan kuluessa. Suurin osa kutistumisesta tapahtuu kappaleen ollessa vielä muotissa mutta kutistuminen voi jatkua vielä pitkään muotista poistamisen jälkeen, kuitenkin hidastuen ajan kuluessa. Lisää kutistumista voi tapahtua jäännösjännitysten lauettessa karkaisussa tai korkeissa käyttölämpötiloissa. [Rosato & al., 2001.] Kutistumaa, joka tapahtuu kappaleen ollessa vielä muotissa, kutsutaan muottikutistumaksi. Kappaleessa muotista poistamisen ja

jäähtymisen jälkeen tapahtuva kutistuma taas on jälkikutistumista. Muottikutistuman ja jälkikutistuman yhteisvaikutusta kutsutaan kokonaiskutistumaksi. [Illig, 2001.]

Kutistuminen aiheuttaa muovituotteilla monenlaisia ongelmia. Esimerkiksi kappaleiden leikkaaminen irti levystä tai niiden muotoilu on hankalaa kutistumisen vielä jatkuessa, sillä dimensiot muuttuvat vielä. Muottikutistuma voidaan tavallisesti huomioda jo muottia suunniteltaessa, yksinkertaisesti suunnittelemalla se hieman liian suureksi, jolloin muottikutistuman jälkeen kappale on halutun kokoinen. Jälkikutistuman arviointi on vaikeampaa, sillä se voi kestää useita päiviä ja jopa viikkoja tai kuukausia valmistuksen jälkeen. Jälkikutistuminen on ajasta ja lämpötilasta riippuvaa siten, että se hidastuu ajan kuluessa ja on nopeampaa korkeammassa lämpötilassa. Dimensioiden kannalta merkittävää se on kuitenkin vain ensimmäisten vuorokausien aikana muovauksen jälkeen. Jälkikutistuman suuruus riippuu myös muovilajista, sillä joillain muoveilla jälkikutistumisen osuus on huomattavan paljon merkittävämpää kuin toisilla muovilajeilla. Aiemmin on luultu jälkikutistuman loppuvan muutamassa viikossa, mutta todellisuudessa se voi parhaimmillaan jatkua yli vuoden ajan. [Fischer, 2003.]

Osakiteisten muovien kutistuminen on tavallisesti merkittävämpää kuin amorfisten, johon osakiteisissä muoveissa tapahtuvasta uudelleen kiteytymisestä. Kun osakiteistä muovia lämmitetään, sen kiteiset alueet muuttuvat amorfisiksi ja molekyylien väliset etäisyydet kasvavat. Materiaalin jäähtyessä, osa sen polymeeriketjuista järjestäytyy uudelleen kiteiseen muotoon ja nämä kiteet pakkautuvat tiiviimmin kuin ennen lämmitystä, ja tapahtuu kutistumista, joka on nähtävissä muovatun kappaleen mittojen pienene- misenä. Amorfisten muovien kutistuminen on pääasiassa seurausta materiaalin kokoon- puristuvuudesta ja riippuu lämpölaajenemiskertoimesta, sillä niillä ei ole lainkaan kitei- siä alueita molekyyliarakenteessaan. Kutistumista tapahtuu siis vain molekyyliketjujen välisen etäisyyden pienenemisen seurauksena. Amorfisten muovien kutistuminen onkin selvästi vähäisempää ja tapahtuu nopeammin, kuin osakiteisten muovien. Amorfisten muovien kutistumista on myös helpompi ennustaa. [Crystallinity in plastics, 2007 - 2010.] Osakiteisten muovien muottikutistuma vaihtelee välillä 0,5 – 5 %, kun amorfisil- la muoveilla arvot ovat vain 0,4 – 0,8 % luokkaa. Polypropeenin muottikutistuma vaih- telee välillä 1,0 – 1,5 % ja jälkikutistuma on 0,4 – 0,5 %:n suuruusluokkaa. [Pajunen, 2006.] Osakiteisten muovien jähmettyessä ja kiteytyessä tapahtuva olomuodonmuutos nestemäisestä kiinteään on jyrkkä, ja tapahtuu tietyllä kapealla lämpötila-alueella. Amorfisilla muoveilla kovettuminen taas tapahtuu suhteellisen laajalla lämpötila- alueella. Myös tämän vuoksi osakiteisten muovien kutistuminen on suurempaa ja epäta- saisempaa kuin amorfisten muovien. [Muovimuotoilu, 2011.] Osakiteisten muovien ki- teiset alueet kutistuvat enemmän, kuin niitä ympäröivät amorfiset alueet, joten osakitei- sillä muoveilla on tavallisesti myös suurempi ja vaihtelevampi kutistumisaste kuin amorfisilla muoveilla. [Maier & Calafut, 1998]. Lisäksi osakiteisten muovien lämmön- johtavuus on yleensä selvästi parempaa kuin amorfisilla muoveilla. Tämän selittää osa- kiteisten muovien järjestäytyneempi rakenne, ja lämpöenergian siirtyminen mielum-

min molekyyliketjuja pitkin, kuin niiden välillä. Poikkeuksena tässä suhteessa on kuitenkin osakiteinen polypropeeni, jonka kiteisyyden suurta vaikutusta lämmönjohtavuuteen ehkäisee sen steerisen molekyyliarakenteen aiheuttama suuri vapaa tilavuus. [Sandell, 2002.]

Kutistumisen seurauksena muovikappaleet voivat altistua myös muunlaisille muodonmuutoksille. Esimerkiksi kun kappale kutistuu epätasaisesti eri alueiltaan, se todennäköisesti vääntyy. Tällaista epätasaista kutistumaa kutsutaan differentiaaliseksi, tai anisotrooppiseksi kutistumiseksi ja se on merkittävä lämpömuovatus kappaleen vääntymisen aiheuttaja. Differentiaalinen kutistuma on seurausta samoista tapahtumista kuin isotrooppinenkin kutistuma, se vaan tapahtuu erisuuruksena kappaleen eri osissa. [Sandell, 2002.]

2.3.3.2 Kutistumiseen vaikuttavia tekijöitä lämpömuovausprosessissa

Kestomuovien lämpömuovauksessa kutistumiseen vaikuttavia tekijöitä on monia. Muovien molekyyliarakenteessa tapahtuvat muutokset lämmityksen ja jäähtymisen aikana ovat varmasti yksi merkityksellisimmistä asioista, jotka selittävät muovien kutistumiskäyttäytymistä. Tavallisesti kutistuminen ei kuitenkaan johdu vain yhdestä tekijästä vaan on seurausta useamman tekijän yhteisvaikutuksesta. Merkittäviä tekijöitä löytyy niin materiaaliominaisuuksista kuin prosessiolosuhteistakin. Seuraavaksi käydään läpi joitain tärkeimmistä kutistumiskäyttäytymiseen vaikuttavista tekijöistä.

Kutistuminen alkaa lämpömuovausprosessissa kuumennetun polymeerikalvon kosketessa jäykkää, jäähdettyä muottia. Tässä vaiheessa tapahtuva kutistuminen voi olla joko rajoittamatonta tai rajoitettua. Rajoittamatonta, eli isotrooppista kutistumista tapahtuu saman verran joka suunnassa, jolloin muovattu kappale kutistuu tasaisesti. Rajoitettua kutistumista on rajoitettu vähintään yhdestä suunnasta, jolloin muovi ei välttämättä kutistu joka suunnassa yhtä paljon. Termisen kutistuman lisäksi kappaleissa tapahtuu myös orientaatiokutistumista. Muovattava muovikalvo orientoituu usein epätasaisesti jo ekstruusioprosessissa tai muovausprosessin aikana tapahtuvan venytyksen seurauksena. Kun muovattu kappale pakotetaan lopulliseen, orientoituneeseen muotoonsa jäähdyttämällä se vasten muottiseinämää, jää rakenteeseen sisäisiä jännityksiä, kun molekyyliorientaation pyrkii palautumaan ennen muovausta vallinneeseen tilaan. Orientaatiokutistumista tapahtuuakin molekyyliketjujen palautumisen seurauksena. Rajoitettu orientaatiokutistuma on tärkeä tekijä ennakoitaessa ja määriteltäessä syitä lämpömuovatuissa tuotteissa ilmeneviin ongelmiin, kuten vääntymiin ja kieroutumiin tai kappaleiden väliin dimensionaalisiin eroihin. [Throne, 2008.]

Eri muovityyppien kutistumiskäyttäytyminen eroaa toisistaan. Muovien kokonaiskutistuman määrään vaikuttavat muovin ominaisuuksista mm. ominaislämpö ja lämmönjohtavuus, sillä se, miten nopeasti ja tehokkaasti muovi kuumenee ja erityisesti jäähtyy lämpömuovausprosessissa vaikuttaa merkittävästi sen kutistumiskäyttäytymiseen [Rosa-

to & al., 2001]. Muovien rakenteessa kutistumiskäyttäytymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi muovin kiteisyysaste, moolimassa sekä moolimassajakauma [Illig, 2001]. Molekyylien orientoituminen, molekyyliarakenteen symmetrisyys sekä moolimassan kasvu tiettyyn rajaan saakka parantavat polymeerien kiteytymistä, ja näin vaikuttavat myös kutistumiskäyttäytymiseen [Pajunen, 2006]. Suuren moolimassan omaavat polymeerit ovat pitkäketjuisia, jolloin ketjujen venyessä muovauksen aikana muodostuu jännityksiä. Näiden jännitysten vapautuessa kappaleen jäähtyessä, molekyyliketjut pyrkivät palautumaan alkuperäiseen muotoonsa, kuten venytetty kuminauha. Tämän seurauksena tapahtuu kutistumista erityisesti virtaussuunnassa, eli lämpömuovattavan levyn ekstruusion suunnassa. Kapean molekyylimassajakauman polymeerit kutistuvat tasaisemmin, ja niitä käyttämällä voidaan minimoida lämpömuovattujen kappaleiden vääntyilyä. [Fischer, 2003.] Mitä suurempi on kiteisyysaste ja mitä paremmin kiteet järjestäytyvät, sitä suurempi on tilavuuden muutos, eli kutistuminen [Rosato & al., 2001]. Lisäksi muovin sulaindeksi, kopolymerointi ja muovin sisältämät lisäaineet, esimerkiksi lujitteet ja väriaineet, vaikuttavat muoville ominaiseen kutistumaan [Pajunen, 2006].

Toisten muovien mittapysyvyys voi olla huomattavasti parempaa kuin toisten. Esimerkiksi polypropeenin muottikutistuma on suhteellisen suuri. Monet muovit kutistuvat vielä pitkään valmistuksen jälkeen. Pienet kutistumat eivät useinkaan vaikuta muovituotteiden käyttöön, sillä ne ovat vielä toleranssien sisällä, mutta suuret, ennustamattomat kutistumat voivat tehdä suunnittelutyöstä lähes mahdotonta. Pääperiaatteena onkin, että kannattaa käyttää muoveja, joiden kutistuminen on hallittavissa. [Rosato & al., 2001.] Taulukossa 1 on listattuna eri muovien kutistumisarvoja.

Taulukko 1: Kutistuman arvoja eri muoveille [Throne, 2008].

Polymer	Shrinkage range [%]	Recommended value [%]
ABS	0.5–0.9	0.7
EVA	0.3–0.8	0.6
FEP fluoropolymer	1.5–4.5	3.0
Polycarbonate (PC)	0.5–0.7	0.6
LDPE	1.5–4.5	3.0
HDPE	2.0–4.5	2.5
PMMA	0.2–0.8	0.6
Homopolymer PP	1.0–2.5	2.0
PS	0.5–0.8	0.6
Rigid PVC	0.1–0.5	0.3
K-Resin	0.4–0.8	0.6
APET	0.3–0.6	0.5
CPET	10–18	12

Muovimateriaalin kiteisyyteen voidaan vaikuttaa mm. raaka-ainevalinnoilla ja prosessointiolosuhteilla sekä lisäaineilla. Polymeerien kiteytymistä lisäävät hidas jäähtyminen,

molekyylien orientoituminen, molekyyliarakenteen symmetrisyys sekä moolimassa kasvu tiettyyn rajaan asti. [Pajunen, 2006.] Lämpömuovattujen kappaleiden kutistumiseen vaikuttavat myös esimerkiksi vaihtelut raaka-aine-erien välillä. Vaihteluiden syitä voivat olla esimerkiksi erot kierrätysmateriaalin osuuksissa käytetyssä raaka-aineessa tai raaka-aineen laadussa sekä muovattavien levyjen tai kalvojen varastointi-ikä ja orientaatio-ominaisuudet. Raaka-aineen sisältämä kierrätetyn muovimateriaalin osuus vaikuttaa kutistumisominaisuuksiin, sillä muovimateriaalin käydessä läpi ekstruusioprosessin yhä uudelleen ja uudelleen, sen molekyyliarakenteessa tapahtuu muutoksia, kuten ketjujen katkeamista, jotka vaikuttavat mm. kiteytymiseen ja näin ollen myös kutistumiseen. [Sandell, 2002.]

Materiaaliominaisuuksien lisäksi myös prosessiolosuhteilla on suuri merkitys kutistumiskäyttäytymisen kannalta. Esimerkiksi identtisistä granulaateista eri ekstruudereilla, tai samalla ekstruderilla eri parametreilla, on mahdollista saada aikaan kutistumiskäyttäytymiseltään erilaista muovattavaa muovilevyä. Samoin kahdella erilaisella lämpömuovauslaitteistolla, samoilla parametreilla valmistettujen tuotteiden kutistumisominaisuudet poikkeavat toisistaan, etenkin jos muovattavat levyt on valmistettu eri raaka-aine-eristä. Identtisestä materiaalista lämpömuovatuissa kappaleissa voi esiintyä noin $\pm 10\%$ kutistumisvaihteluita. [Illig, 2001.] Valmistustoleransseja, jotka ovat alle 10% kutistuman arvosta, ei siis pitäisi hyväksyä. Kutistumista mitattaessa on mittauskohdat ja menetelmät valittava siten, ettei mittaustulokseen sisälly lainkaan kappaleen muodonmuutoksen aiheuttamaa virhettä. [Sandell, 2002.] Myös muovauksessa käytetyillä muoteilla on oma merkityksensä tuotteen kutistumiskäyttäytymiselle. Esimerkiksi positiivimuottia käytettäessä, on erityisesti muottikutistuma pienempää kuin negatiivimuottia käytettäessä, sillä positiivimuotti rajoittaa kutistumista kappaleen jäähtyessä sen päälle. [Rosato & al., 2001.] Tyypillinen kappaleen kutistuma amorfisilla muoveilla on $0,5\%$ positiivimuotilla ja 1% negatiivimuotilla. Osakiteisillä muoveilla taas 2% positiivimuotilla ja $2-3\%$ negatiivimuotilla. [Throne, 1996.] Myös erilailla kuluneet muotit ja suurten, tai monipesämuottien eri osissa epätasaisesti toimiva jäähdytysjärjestelmä vaikuttavat lopputulokseen [Fischer, 2003].

Koneiden, muottien, työkalujen ja materiaalien lisäksi lopputulokseen vaikuttavat myös prosessiparametrit, kuten muotoilupaine ja -aika, muotin lämpötila sekä jäähdytysaika. Suurin vaikutus on jäähtymisolosuhteilla, kuten jäähtymisnopeudella, ja kutistumisen voidaankin sanoa liittyvän aina jäähtymiseen. Jäähtymisnopeus vaikuttaa jäähtymisen kestoon ja siihen, miten kauan kiteytyminen ja kiteiden pakkautuminen voi kestää. Eri-tyisesti osakiteisten muovien kohdalla kriittisin vaihe kutistumisen kannalta on juuri kappaleen jäähtyminen. Hidas jäähtyminen lisää kutistumista antaessaan muovimolekyyleille enemmän aikaa kiteytyä ja saavuttaa relaxoitunut tila. Osakiteisillä muoveilla pidempi jäähtymisaika johtaa siis suurempaan kiteisyyteen, joka puolestaan korostaa kutistumista. Lopullinen kiteisyysaste muoveilla, jotka kiteytyvät suhteellisen hitaasti (kuten PP), riippuu voimakkaasti jäähdytysnopeudesta. [Rosato & al., 2001.] Noin $70 -$

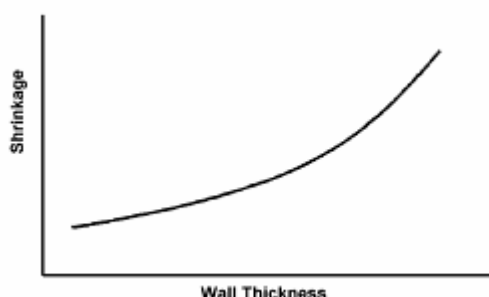
80 % dimensionaalisista muutoksista, eli kutistumasta, aiheutuvat kun kappale jäähtyy muovauslämpötilasta huoneenlämpötilaan. 50 - 75 % kutistumisesta tapahtuu ennen kun kappaleen lämpötila on laskenut taipumislämpötilaan (*heat distortion temperature, HDT*). [Throne, 1996.] Tämä on varsin huomattava osa ja koostuu sekä termisestä supistumisesta että tiheyden muutoksista, jotka ovat osa kiteytymisprosessia. Suurin osa kutistumisesta tapahtuu kappaleen jäähtyessä huoneenlämpötilaan, mutta seuraavien 15-30 minuutin aikana tapahtuu tavallisesti myös huomattavaa kutistumista. Valtaosa muovimateriaaleista jatkaa kutistumistaan vielä 30 minuutin jälkeenkin. [Rosato & al., 2001.]

Jäähtymisolosuhteiden lisäksi kappaleen kutistumiskäyttäytymiseen vaikuttavat mm. orientoituminen, muovaus- ja muottilämpötila, kappaleen seinämäpaksuus, kappaleen geometria sekä muovauspaine. Sekä muottikutistuman että jälkikutistuman syntyyn vaikuttavat hyvin pitkälti samat asiat prosessissa ja materiaaliominaisuuksissa. Erityisen merkittäviä tekijöitä jälkikutistuman kannalta ovat lämpötila- ja kosteusolosuhteet muovaamisen aikana. [Fischer, 2003.]

Kalvon valmistusvaiheen, eli ekstruusion, prosessointiolosuhteet vaikuttavat valmiin tuotteen kutistumiskäyttäytymiseen. Esimerkiksi orientoitumattomien muovikalvojen pituus ja leveys pienenevät yleensä, kun ne jäähtyvät muovauslämpötilasta. Ongelmia lämpömuovausprosessiin tulee, jos muovilevy on voimakkaasti orientoitunut ekstruusioprosessissa, jolloin levyssä olevat jännitykset laukeavat lämpömuovauksessa. Myös lämpömuovauksen aikana muovilevy orientoituu voimakkaasti ja orientaatio pakotetaan jäämään pysyväksi nopealla jäähdytyksellä. Muovilevy kutistuu jäähtyessään jännitystilojen vaikutuksesta. [Sandell, 2002.] Monet prosessointiparametreista vaikuttavat orientaatiokutistumaan. Tällaisia ovat esimerkiksi kalvon lämpötila muovauksessa, muovauspaineen ilman lämpötila, kalvon alkuperäinen kiteisyysaste, materiaalin uudelleenkiteytymisnopeus sen jäähtyessä muotissa, muotin lämpötila sekä muovatun kappaleen lämpötila muotista poistamisen hetkellä [Throne, 2008]. Muovattavan kalvon orientoituminen ekstruusiassa aiheuttaa kalvon suurempaa kutistumista ekstruusion suunnassa kuin sitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Orienoituneissa materiaaleissa kutistuminen on yleensäkin tavallisesti suurempaa kuin orientoitumattomissa, johtuen järjestäytyneen rakenteen relaxoitumisesta satunnaisempaan muotoon ajan kuluessa. [Maier & Calafut, 1998.] Orienoituminen ja venytys prosessoinnin seurauksena vaikuttavat samoin myös amorfisten muovien kutistumiseen. Kuitenkin osakiteisillä muoveilla orientaation vaikutus näkyy selvemmin, koska kiteytymisen vaikutuksesta kutistuminen on muutenkin merkittävämpää. [Shrinkage in plastic processing, 2007.]

Kappaleen seinämäpaksuuden kasvaessa tarvitaan jäähtymiseen enemmän aikaa, jolloin hitaamman jäähtymisen seurauksena paksuseinämäiset kappaleet kutistuvat prosentuaalisesti enemmän kuin ohutseinämäiset. Hidas jäähtyminen sallii siis enemmän kiteytymistä ja kiteiden pakkautumista tapahtuvan, jolloin myös kutistumista tapahtuu suhteel-

lisesti enemmän. Paksummat seinämät tarkoittavat siis pidempiä syklejä, matalampia jännityksiä, suurempaa kiteisyyttä sekä suurempaa kutistumista (kuva 14). [Fischer, 2003.]



Kuva 14: Kappaleen seinämäpaksuuden vaikutus kutistumaan [Fischer, 2003].

Seinämäpaksuuden lisäksi myös muovattavan kappaleen muoto vaikuttaa kutistumiskäyttäytymiseen. Esimerkiksi paljon erilaisia geometrisia piirteitä, kuten kulmia ja muita yksityiskohtia, sisältävissä kappaleissa kutistuminen on erilaista eri kappaleen eri kohdissa. Myös pinta-alaltaan laajoissa muoteissa voi muotin eri alueilla olla eriäviä lämpötila-arvoja, jolloin aiheutuu epätasaista jäähtymistä ja mahdollisia ongelmia differentiaalisesta kutistumasta johtuen. [Fischer, 2003.] Lisäksi muovin suuri venyminen lämpömuovausprosessissa, esimerkiksi profiililtaan syvien kappaleiden kohdalla, vaikuttaa kappaleen orientaation ja materiaalijakauman kautta myös kutistumaan [Illig, 2001].

Myös muovattavan kappaleen geometria ja seinämänpaksuus vaikuttavat kutistumiskäyttäytymiseen. Esimerkiksi kappaleissa, joissa on paljon erilaisia muotoja, kuten kulmia ja muita yksityiskohtia, on kutistumiskäyttäytyminen erilaista eri kohdissa kappaletta.

Seinämäpaksuuden kasvattamisella on sama vaikutus kutistumiseen kuin muottilämpötilan nostamisella: tarvitaan enemmän aikaa jäähtymiseen, jolloin hitaampi jäähtyminen aiheuttaa enemmän jännitysrelaksaatiota ja enemmän kutistumista sekä amorfisista, että osakiteisistä muoveista muovatuissa kappaleissa. Osakiteisillä muoveilla hitaampi jäähtyminen edistää suurempaa kiteytymisastetta ja kiteiden tiiviimpää pakkautumista, mikä johtaa suurempaan muottikutistumaan, mikäli muut muuttuja pysyvät vakiona (taulukko 2). Mitä korkeampi on siis muottilämpötila, sitä hitaammin kappale jäähtyy. Hitaampi jäähtyminen taas edistää suurempaa kiteytymisastetta osakiteisissä kappaleissa. Samalla sykli hidastuu, muottikutistuma kasvaa ja jälkikutistuman osuus vähenee. Muottikutistumista voidaan siis pyrkiä vähentämään käyttämällä viileämpiä muotteja, mutta toisaalta kylmät muotit ja nopeat syklit voivat jumittaa jännityksiä muovatussa kappaleessa samalla kun vähentävät tapahtuvaa muottikutistumaa. Kuitenkin myöhemmin, ajan kuluessa ja lämpötilan ja kosteuden vaikutuksesta, voi ilmetä lisää kutistumista, joka tunnetaan jälkikutistumana. [Fischer, 2003.] Muottilämpötilan vaikutus jälkikutistumaan on siis päinvastainen kuin muottikutistumaan ja voidaankin sanoa, että jälkikiteytymisen aiheuttamaa jälkikutistumaa voidaan ainakin teoreettisesti vähentää korkeilla muot-

tilämpötiloilla ja lämpökäsittelyllä. [Pajunen, 2006]. Myös kappaleen poistaminen muotista kuumana voi aiheuttaa suuremman kutistuman kuin viileämpänä poistaminen [Illig, 2001].

Taulukko 2. Muottilämpötilan vaikutus muottikutistumaan HDPE:n lämpömuovauksessa. [Throne, 2008]

Mold temperature [°C]	Shrinkage [%]
40	1.8
65	1.9
75	1.9
90	2.4

Muovaustarkkuus ja kutistumiskäyttäytyminen riippuvat myös muovauspaineesta, eli paineesta kappaleen ja muotin välillä muovauksen ja jäähtymisen aikana. [Illig, 2001]. Muovisulat ovat puristuvia, erityisesti korkeissa paineissa, joita käytetään ruiskuvalussa ja ekstruusiassa. Sulan muovimassan prosessoinnista aiheutuva kutistuminen ei olekaan seurausta pelkästään lämpölaajenemisesta ja -supistumasta, vaan se riippuu myös sulan puristuvuudesta. Tämä riippuvaisuussuhde on kuitenkin monimutkainen, sillä prosessiolosuhteet määrittävät suuruuden, jolla muovisulaa puristetaan. Kuitenkaan prosessiolosuhteet eivät useinkaan ole yhtenevät koko kappaleen alueella. [Maier & Calafut, 1998.]

2.3.3.3 Differentiaalinen kutistuminen

Kutistumisen seurauksena kappaleissa voi tapahtua myös muunlaisia muodonmuutoksia, kuten taipumista ja vääntyilyä. Differentiaalisella kutistumisella tarkoitetaan materiaalin epätasaista kutistumista tuotteessa. Tämä on usein merkittävin lämpömuovattun kappaleen vääntyilyn aiheuttaja. Muovituotteiden vääntyileminen onkin yleensä seurausta muovien kutistumiskäyttäytymisestä, joka taas riippuu joko muovista tai prosessoinnista. Vääntyilyä voidaan siis minimoida kuten kutistumistakin, esimerkiksi käyttämällä muoveja, joilla on kapea molekyyli-massajakauma. [Sandell, 2002.]

Polymeeri voi jatkaa kiteytymistä vielä pitkään muovaamisen ja jälkikäsittelyiden jälkeen. Rajoittamaton uudelleenkiteytyminen on usein pääsyy osakiteisten muovikappaleiden differentiaaliseseen kutistumiseen ja sen seurauksiin. Yksi tekijöistä, jotka voivat vaikuttaa tuotteen lopullisen kutistuman tasaisuuteen, on epätasainen orientaatio muovattavassa kalvossa. Tavallisesti ekstruusion suuntainen orientaatio on suurempaa kuin sitä vastaan kohtisuora orientaatio. [Throne, 2008.] Osakiteisillä materiaaleilla kappaleen eri osat voivat jäähtyä eri nopeuksilla, jolloin hitaammin jäähtyvillä on suurempi kiteisyysaste ja näin myös suurempi kutistuma. Myös kappaleen seinämänpaksuusvaihtelut vaikuttavat jäähtymisnopeuteen ja näin myös kutistumaan. Jos kappaleeseen on suunniteltu kaksi tai useampi eri paksuinen seinämä, paksumman seinämän jäähtyminen tulee kestämään kauemmin ja tällöin sen kiteytymiselle tulee olemaan enemmän aikaa

ja se tulee myös kutistumaan enemmän. Tämän seurauksena enemmän kutistunut seinämä tulee taivuttamaan kappaletta ja aiheuttamaan vääntymistä. Myös geometriset piirteet, kuten terävät kulmat, voivat aiheuttaa epätasaista jäähtymistä. [Fischer, 2003.] Lisäksi epätasaisen orientaation aiheuttama epätasaisten jäännösjännitysten laukeaminen aiheuttaa jopa useita päiviä kestäväää taipumista ja kieroutumista [Sandell, 2002]. Epätasaisesta jäähtymisestä aiheutuvia muodonmuutoksia voivat aiheuttaa myös erityisesti pinta-alaltaan laajojen muottien erilaiset lämpötilat muotin eri alueilla [Fischer, 2003].

2.3.3.4 Kutistuman ennustaminen ja hallinta

Muovimateriaaleja lämpömuovattaessa kutistuminen on yksi merkittävimmistä mittatarkkuuteen vaikuttavista tekijöistä. Mittojen pienenemisen lisäksi se aiheuttaa ongelmia esimerkiksi sovitteiden ja kokoonpanon kannalta. Kutistumisen seurauksena kappaleeseen muodostuu myös sisäisiä jännityksiä, jotka vaikuttavat sen mekaanisiin ja fysikaalisiin piirteisiin, aiheuttaen usein ongelmia loppukäytössä esimerkiksi korotetuissa lämpötiloissa. Lisäksi materiaalin kemiallinen kestävyys voi heikentyä sisäisten jännitysten vuoksi, jolloin kappale altistuu helpommin esimerkiksi jännityssäröilylle. Lämpömuovattun muovituotteen mittatarkkuuden voidaan sanoa määräytyvän jo kappaletta suunniteltaessa, sillä kappaleen koko ja muoto vaikuttavat muovattavan materiaalin venymiseen, jakautumiseen, ja näin ollen myös lopputulokseen. [Pajunen, 2006.] Kyky ennustaa ja hallita erilaisten muovituotteiden kutistumiskäyttäytymistä on siis tärkeää, jotta voitaisiin ennakoida ja välttää myös joitain kutistumisen aiheuttamia ongelmia. Seuraavaksi käydään läpi joitain kutistuman ennustamisen ja hallinnan pääasioita.

Kutistuman ennustaminen

Lämpömuovausprosessissa muovattavan muovilevyn tai -kalvon kutistumiskäyttäytymisen ennustamiseksi voidaan muovattavalle materiaalille tehdä eräänlainen kutistumistesti ennen lämpömuovausta. Kutistumistestissä muovilevystä leikataan tietyn kokoinen pala, johon merkitään leikkaussuunta ja ekstruusiosuunta. Tämän jälkeen pala laitetaan muovauslämpötilaan uuniin PTFE-kalvolla ja talkilla peitettynä vähintään puoleksi tunniksi, jonka jälkeen sen annetaan jäähtyä. Jäähtynyt pala mitataan ja kutistuma voidaan määrittää seuraavasti

$$\text{kutistumis\%} = \frac{\text{alkumitat} - \text{loppumitat}}{\text{alkumitat}} \times 100\% \quad (1)$$

Lisäksi voidaan selvittää levyn anisotropia määrittämällä pituussuuntainen ja poikisuuntainen kutistuma erikseen. Tällaisia kutistumistestejä suositellaan toistettavaksi aina, kun raaka-aineen sekoitussuhde, ekstrudoitu muovikalvo tai sen toimittaja vaihtuu tai kun ekstruusioparametrejä muutetaan. [Illig, 2001.]

Kutistumistestillä saadaan tietoa myös muovattavan levyn orientoitumisesta. Jos raaka-aine on voimakkaasti orientoitunut esimerkiksi ekstruusion suunnassa, aiheutuu lämpömuovausprosessissa taipumista. Varsinkin monipesämuotissa, jossa on samalla etäisyydellä sekä pituus- että poikittaissuunnassa toisistaan olevia muottipesiä, on taipuminen ekstruusion suunnassa huomattavasti voimakkaampaa kuin poikittaisessa suunnassa. Lämpömuovausprosessissa orientaatio lisääntyy myös muovauksen aiheuttaman venytyksen myötä. Muovauksen aikana tapahtunut voimakas orientaatio pienentää huomattavasti kappaleen lujuutta venymissuuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa ja voi aiheuttaa kappaleen repeämisen tässä suunnassa. Kun raaka-aineessa jo ennestään oleva orientaatio ja muovauksen aiheuttama orientaatio vaikuttavat yhdessä, voi tuotteeseen syntyä hyvinkin heikkoja kohtia. Plastiset materiaalit ovat tavallisesti hyvin vahvoja orientaation suunnassa, mutta melko heikkoja orientaatiota vastaan poikittaisessa suunnassa. [Illig, 2001.]

Edellä mainitulla kutistumistestillä pystytään kuitenkin ennustamaan vain muovattavan materiaalin kutistumiskäyttäytymistä. Lopullisen lämpömuovattun kappaleen kutistumiskäyttäytymisen ennustaminen on huomattavasti vaikeampaa. Kappaleessa lämpömuovauksen seurauksena tapahtuva muottikutistuma tulee huomioida jo muottia suunniteltaessa laskemalla, kuinka paljon ylisuureksi kappaleen tulee muotissa muotoutua, jotta se kutistumisen jälkeen olisi halutun kokoinen ja sovitujen toleranssien rajoissa. Kutistumisarvoja eri materiaaleille löytyy esimerkiksi raaka-ainetoimittajien taulukoista, mutta niitä tulee hyödyntää varoen ja käsitellä vain suuntaa antavina. Todelliset kutistumisarvot riippuvat niin monista asioista, että vain kokeilemalla voidaan määrittää juuri tietynlaiselle tuotteelle pätevä kutistumisarvo ja silti kutistumiskäyttäytyminen on jokaisen tuotteen kohdalla yksilöllistä ja voi muuttua pienienkin muutosten seurauksena. [Rosato & al., 2001.] Esimerkkinä tästä on monipesämuotilla muovattujen kappaleiden kutistumiskäyttäytyminen: vaikka käytetty raaka-aine on täsmälleen samaa, voi kutistuma vaihdella muottipesien kesken selvästi. Syynä tähän voi olla esimerkiksi epätasainen lämpötilajakauma muotin tai muovattavan levyn eri osissa sekä muottipesien väliset dimensioerot. Myös kutistuminen eri suunnissa kannattaa huomioida, sillä erilaisesta orientaatiosta johtuen materiaali kutistuu erilalla ekstruusion suunnassa, kuin sitä vastaan kohtisuorassa suunnassa.

Kutistuman ennustaminen koostuu siis muustakin kuin materiaalin tiedoista saatavasta korjaustekijästä. Kutistuminen riippuu mm. muovausprosessin paineesta ja muovissa jäähtymisen aikana tapahtuvista tilavuuden muutoksista sen kiteytyessä ja kiteiden järjestyessä uudelleen, kuten edellä on kerrottu. Myös jälkikutistuman suuruus riippuu monista osatekijöistä, jotka myös tulisi pystyä ennustamaan tarkasti, jotta jälkikutistuma pystyttäisi ennustamaan. Täysin luotettavan kaavion luominen lämpömuovattun kappaleen kutistumalle ei siis ole mahdollista. [Tripathi, 2002.] Jälkikutistuminen voi kestää useita päiviä ja jopa viikkoja tai kuukausia, kuitenkin hidastuen ajan kuluessa. Kappaleen mittojen kannalta merkittävintä on ensimmäisten vuorokausien aikana tapahtuva

kutistuminen. On havaittu, että kappaleen nopea jäähdyttäminen, esimerkiksi upottamalla se kylmään nesteeseen, saa aikaan nopean kutistumisen, jonka suuruus on samaa luokkaa kuin kappaleella, jonka annetaan jäähtyä hitaasti. Nopealla jäähdytyksellä saavutetaan kuitenkin kappaleen lopulliset mitat nopeammin, jolloin saadaan välitöntä palautetta oikeista muovausparametreista. [Fischer, 2003.]

Sellaisten tuotteiden kohdalla, joiden dimensiot ovat erityisen kriittisiä, tulee kutistumiskäyttäytymiseen kiinnittää huomiota eri tuotteen alueilla ja käyttää sen määrittämiseen esimerkiksi muottien prototyyppejä [Illig, 2001]. Muotin suunnittelija, muovaaja tai materiaalin toimittaja eivät koskaan voi olla täysin varmoja tarkasta kutistumiskäyttäytymisestä missään osassa muottia, sillä kaikki suunnittelussa käytettävät tiedot ovat oletuksia ja arvioita. Usein paras tapa riittävän tarkan lopputuloksen saavuttamiseksi onkin valmistaa muotti kahdesti: ensin raakaversio arvioiden ja ennusteiden perusteella ja tämän jälkeen lopullinen versio raakaversiolla saatujen tulosten pohjalta. [Fischer, 2003.] Muovituotteiden kutistumista ja siitä aiheutuvaa muodonmuutosta voidaan kohdustallisella luotettavuudella ennustaa erilaisilla tietokoneavusteisilla muovien virtauskäyttäytymistä simuloivilla ohjelmilla. Ennustamisessa käytetään apuna mm. muovin ja muotin lämpötilaa, muottipaineita, muovatun kappaleen jännityksiä ja muita prosessin muuttujia. Ennustettuja kutistuma-arvoja eri tuotteen alueilla voidaan käyttää esimerkiksi muotin suunnittelussa. [Rosato & al., 2001.]

Kutistumisen ennakointimetodit kehittyvät jatkuvasti. Esimerkiksi Haihong Xun tekemässä tutkimuksessa on kehitetty analyyttinen metodi viskoelastisen materiaalimallin kutistumisen ennustamiselle. Muotin geometria, materiaalin ominaisuudet, prosessin asetukset ja muut vastaavat prosessiolosuhteet määritettiin tutkimuksessa simuloimaan kaupallista lämpömuovausta. Tutkimuksen tavoitteena oli arvioida kappaleen lopulliset mitat muovausprosessista aiheutuviin jäännösjännityksiin perustuen. Teoreettinen analyysi kehitettiin mukautettavaksi erilaisille materiaaleille, olosuhteille sekä muottigeometrioille. Kutistumismalli koostuu lämpömuovausprosessin eri vaiheiden analyysistä ja se on kehitetty ja vahvistettu monimutkaisen geometrian lämpömuovaussovelluksella. Tutkimuksessa kehitetyllä kutistumisanalyysillä voidaan ennustaa lämpömuovatun kappaleen lopullinen kutistuma käyttäen hyväksi mm. materiaaliominaisuuksia, muovausprosessin asetuksia ja seinämänpaksuusjakaumaa. Tutkimuksessa luodun mallin mukaan kutistuminen on venymisestä aiheutuneen rakenteellisen jännityskasauman ja pakotetusta jäähtymisestä aiheutuneen termisen jännityskasauman yhteisvaikutus. Näin ollen jännitysjakaumaa ja siitä seuraavaa relaksaatiota voidaan käyttää määrittämään kutistumaa. Venymishistoria riippuu voimakkaasti muotin geometriasta, muovauspaineesta, lämpötilasta ja muista tekijöistä. Venyminen loppuu, kun polymeerikalvo koskettaa muottia kokonaisuudessaan. Kun kalvon lämpötila putoaa, kappale saavuttaa jäykkyytensä ja kykynsä säilyttää muotin muoto. Merkittävä, äkillinen lämpötilan lasku ja suhteellisen pitkä jäähtymisajanjakso merkitsee sitä, ettei lämpövaikutusta relaksaatio- ja kutistumiskäyttäytymiseen voida aliarvioida. Kun kappale irrotetaan muotista, jäännösjännitys

vapautuu ja sen seurauksena tapahtuu kutistumista, kieroutumista ja vääntymistä. [Xu & Kazmer, 2001.]

Kutistuman hallinta

Koska lämpömuovatu muovikappaleen kutistuma riippuu monesta tekijästä, voidaan kutistumaa myös hallita monin eri keinoin. Kutistuman hallinnalla voidaan saavuttaa useita hyötyjä, kuten esimerkiksi alhaisemmat tuotantokustannukset lyhentyneestä prosessointisyklin ajasta ja tuotannon joustavuudesta johtuen. Joustavassa tuotannossa samalla prosessilla voidaan valmistaa kappaleita eri asiakkaille, riippumatta siitä, millaisia kappalekohtaisia vaatimuksia asiakkaat ovat asettaneet. Tällainen prosessiolosuhteiden joustavuus minimoi tarpeen lisälaitteiston haninnalle. [Pat. US. H001301.] Kappaleessa tapahtuvan kutistuman hallittavuutta voidaan parantaa esimerkiksi materiaalia tai siinä käytettäviä lisäaineita vaihtamalla. Myös prosessiparametreja muuttamalla voidaan kutistumista hallita. On kuitenkin tärkeää muistaa, että materiaalin tai prosessiparametrien muuttaminen kutistuman hallitsemiseksi voi vaikuttaa myös johonkin toiseen ominaisuuteen muovattavassa kappaleessa, eikä vaikutus aina ole positiivinen tai toivottu. Myös esimerkiksi prosessin sykli aika voi kasvaa, minkä seurauksena prosessin tuottavuus laskee ja tuotteiden valmistuskustannukset kasvavat. Äkillisesti ilmenneisiin muutoksiin esimerkiksi kappaleiden kutistumisarvoissa syitä etsittäessä, kannattaa kiinnittää huomiota prosessissa tai materiaalissa mahdollisesti tapahtuneisiin muutoksiin, kuten muottityökalun heikentynyt jäähdytys, muotin vaurioituminen tai muutokset raaka-aineen koostumuksessa. Mikäli kutistumaa ei voida hallita, materiaaliominaisuuksien tai prosessiparametrien avulla, jää viimeiseksi vaihtoehdoksi kappaleen uudelleensuunnittelu, joka on kallis ja aikaavievä prosessi. Lämpömuovattavat kappaleet kannattaakin suunnitella valmiiksi siten, että kutistuma on otettu huomioon ja sen aiheuttamat ongelmat minimoitu. Esimerkiksi vaihtelevia seinämäpaksuuksia tai muita epätasaista jäähtymistä edistäviä piirteitä tulisi välttää. Jotta vältettäisiin myös raaka-aine-erien vaihteluista aiheutuvat erot kappaleiden kutistumisessa, tulisi raaka-aineen koostumus pyrkiä pitämään mahdollisimman muuttumattomana esimerkiksi kierrätysmateriaalin määrän ja kierrätysasteen sekä lisäaineiden suhteen. Myös raaka-aineen ja ekstrudoitujen muovikalvorullien varastointi-ikä ja -olosuhteet tulee pitää vakiona. [Fischer, 2003.]

Materiaaliominaisuuksista muovin kiteisyysaste on hyvin merkittävässä osassa muovituotteiden kutistumisessa. Sellaisten tuotteiden kohdalla, joiden mittojen toleranssit ovat tiukat ja joiden mittapysyvyys on tärkeää, kannattaa käyttää materiaaleja, joiden kutistuma on pientä. Esimerkiksi mahdollisuuksien mukaan osakiteisen muovin vaihtaminen amorfiseen, johtaa kutistuman vähenemiseen ja samalla sen hallittavuuden paranemiseen. [Fischer, 2003.] Muovituotteiden kutistumista voidaan hallita esimerkiksi täyte- ja lisäaineilla sekä lujitteilla. Kutistumista vähentävä vaikutus perustuu erisuuruisiin lämpölaajenemiskertoimiin, jotka estävät polymeeriketjujen uudelleenjärjestäytymistä jäähtymisen aikana. Esimerkiksi mineraaliset lisä- ja täyteaineet vähentävät kutistumista, polymeerejä alhaisemman lämpölaajenemiskertoimensa vuoksi. [Characterization and

failure analysis of plastics, 2003.] Lisäaineiden myötä kuitenkin myös kappaleen anisotropia, eli ominaisuuksien erilaisuus eri suunnissa, lisääntyy. Tämä on ominaista erityisesti kiteisillä ja lujitetuilla muoveilla. [Pajunen, 2006.] Täyte- ja lujiteaineiden vaikutus lämpömuovatus kappaleen kutistumiseen riippuu myös paljon niiden fyysisestä muodosta. Esimerkiksi kuitumaiset lisäaineet, kuten lujitteet, muovimateriaalissa aiheuttavat sekä amorfisten että osakiteisten muovien kohdalla sen, että muutoin isotrooppinen kutistuma muuttuu anisotrooppiseksi. Partikkelimaiset lisäaineet, kuten talkki tai lasihelmet, taas ehkäisevät orientaation vaikutusta kutistumaan ja näin vähentävät sekä tavallista, että differentiaalista kutistumaa. Partikkelimaisten lisäaineiden lisääminen osakiteisiin muoveihin parantaa usein myös kutistuman ennustettavuutta. [Fischer, 2003.]

Myös ydintämisaineiden avulla on onnistuneesti pystytty hallitsemaan erityisesti osakiteisten polymeerien kutistumista. Ydintämisaineiksi kutsutaan hiukkaskooltaan pieniä, kemiallisia yhdisteitä, jotka muovimateriaaliin lisättynä kiihdyttävät kiteiden muodostumista. Ydintämisaineita käytetään kasvattamaan polymeerin kiteytymisnopeutta, jonka seurauksena kiteitä myös muodostuu enemmän. Ydintämisaineiden avulla kiteytymistä kiihdyttämällä pyritään muoviteollisuudessa lyhentämään sykliä ja parantamaan linjanopeutta. Kun kiteytyminen käynnistyy tavallista korkeammassa lämpötilassa, tarvitaan vähemmän jäädyttämistä ja siis vähemmän aikaa. Tämän seurauksena prosessin tuottavuus voi kasvaa jopa 40 % aiempaan verrattuna. Myös prosessin joustavuus paranee, mahdollistaen esimerkiksi prosessin hidastamisen tarpeen vaatiessa kutistumisen hallitsemiseksi. Kiteisyyden ja morfologian parantaminen myös valmistettavien tuotteiden optisten ja mekaanisten ominaisuuksien parantamiseksi onnistuu ydintämisaineiden vaikutuksesta, ja myös kappaleiden vääntyileminen on saatu vähenemään. [Thermoforming primer, 2010.] Orgaanisia, tavallisesti tehokkaampia, ydintämisaineita ovat esimerkiksi sorbitoli, hiilimusta sekä toiset polyolefiinit. Epäorgaanisia ydintämisaineita taas ovat esimerkiksi talkki, sinkkioksidi, alumiinsilikaatti sekä savi. [Pat. US. H001301.] Myös tietyt lisäaineet voivat toimia ydintäjinä, kunhan hiukkaskoko on riittävän pieni. Esimerkiksi väripigmenttipartikkelit voivat toimia sferuliittien ytiminä sopivan hiukkaskokonsa ansiosta ja näin lisätä kiteisyyttä. Tämä on kuitenkin usein ongelmallista tuotettaessa erivärisiä kappaleita, joiden mittapysyvyys tulisi olla sama. Ydintämisaineet edistävät kuitenkin myös materiaalin homogeenista kiteytymistä ja näin ollen myös isotrooppista kutistumaa, ja vähentävät siis differentiaalisesta ja anisotrooppisesta kutistumisesta aiheutuvia ongelmia, kuten vääntyilyä. [Dimensional control/warpage reduction, 2011.] Ydintämisaineet siis parantavat kappaleiden yhdenmukaisuutta ja laatua sekä parantavat mittapysyvyyttä. Esimerkiksi lisäämällä ydintäjiä erivärisiksi pigmentoiduihin seoksiin, saadaan kiteytymislämpötila ja kutistuminen yhdenmukaisemmaksi erivärisissä kappaleissa. Näin lisätään prosessin joustavuutta ja parannetaan kappaleiden laatua. Tämä on erityisen tärkeää pigmentoiduissa materiaaleissa tai kierrätyssesteemeissä, joissa prosessinmuuttuvuus on erityisen korkea. [Thermoforming primer, 2010.]

Lämpömuovausprosessissa muovien kutistuminen on huomioitava esimerkiksi muotin suunnittelussa sekä prosessiparametrien asettamisessa. Prosessiolosuhteiden avulla tapahtuva kutistuman hallinta lähtee perusasioista, kuten siitä, että kutistuma kasvaa lisääntyneen orientaation myötä ja että negatiivimuotilla valmistettujen kappaleiden kutistuma on yleensä suurempi kuin positiivimuoteilla valmistettujen. Koska kappaleen kutistumaan vaikuttaa prosessin aikana lukuisat asiat, on oleellista selvittää, mitä parametrejä voidaan muuttaa ilman että kappaleen muut ominaisuudet kärsivät. Muottikutistumaa on tavallisesti helpompi hallita prosessiparametrien avulla, kuin jälkikutistumaa. Keskenään identtisiä tuotteita valmistettaessa on erityisen tärkeää säilyttää olosuhteet samanlaisina koko prosessin ajan, koska pienilläkin muutoksilla esimerkiksi lämpötilassa voi olla merkittäviä vaikutuksia kappaleiden mittapysyvyyteen yhdenmukaisuuteen.

Muotin ja kappaleen jäähdytyksellä on suurin merkitys kappaleen kutistumisen kannalta. Jäähdytysolosuhteiden hallinta onkin tehokkain tapa hallita kutistumista prosessissa, ja jo muottisuunnittelussa tulisi huomioida esimerkiksi muotin tasainen jäähdyttäminen. Kappaleen jäähdytys tulee toteuttaa mahdollisimman tasaisesti, kuitenkin huomioiden kappaleen yksityiskohdat, kuten eripaksuiset alueet, jotka vaativat tehokkaampaa jäähdytystä. [Fischer, 2003.] Muottien lämpötilan tulee olla säädeltävissä sisäisten jäähdytyskanavien avulla, jotta jäähtymisolosuhteisiin voitaisiin vaikuttaa mahdollisimman suoraan. Jäähdystyteen vaikuttavat myös näiden kanavien sijainti sekä muottimateriaalin lämmönjohtavuus. [Plastic thermoform design guidelines, 2000 - 2011.] Kappaleen lämpötila muotista poistettaessa tulee olla riittävän alhainen, jotta kappaleessa ei tapahtuisi muodonmuutoksia sen jatkaessa jäähtymistä muotin ulkopuolella. Nopea jäähdytys muotista poiston jälkeen kiihdyttää kappaleen jälkikutistuman tapahtumaan nopeasti, jolloin vältetään myöhemmiltä dimensioiden muutoksilta. Nopea jäähdytys ei kuitenkaan vaikuta jälkikutistuman kokonaismäärään, vaan ainoastaan nopeuttaa sitä. [Fischer, 2003.]

Lämpömuovattava muovilevy orientoituu ekstruusiassa yleensä enemmän ekstruusion suunnassa kuin sitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Tällöin myös kutistuma on suurempaa suunnassa, jossa orientaatiota on enemmän. Orientaatiosta johtuvaan differentiaaliseen kutistumaan voidaan vaikuttaa esimerkiksi vaikuttamalla muovikalvon orientaatioon joko ekstruusio- tai lämpömuovausprosessissa. Esimerkiksi ekstruusioprosessin nopeus, lämpötila ja valmistettavan levyn mitat vaikuttavat levyyn jääviin jännityksiin ja orientaatioon, jotka voivat vaikuttaa levystä lämpömuovauksella valmistetun kappaleen mittoihin. [Plastic thermoform design guidelines, 2000 - 2011.] Ekstruusiassa kalvon muodostuva orientaatio on suoraan verrannollinen ekstruuderin suutinaukon ja kalvon paksuuden väliseen suhteeseen, sekä materiaalin sulalämpötilaan ja jännitykseen kalvon vedossa. Suuttimen ja kalvon paksuuden suhde sekä sulalämpötila tulee minimoida tämän orientaation minimoimiseksi. Suositeltu koko suuttimelle on 10 -15 % suurempi kuin levyn paksuus. [A guide to thermoform processing of polypropylene, 2010.] Ekstruusion jälkeen muovikalvo voidaan myös orientoida venyttämällä sitä

kuumennettuna, jolloin kiteytyminen ja myös kutistuma lisääntyvät näin syntyneen orientaation suunnassa. Kaksiakσιαalisesti muovikalvoa venyttämällä pyritään orientatio saamaan molemmissa suunnissa yhtä suureksi, jolloin myös kutistuma on yhtä suurta molemmissa suunnissa. [Crystallinity in plastics, 2007 - 2010.]

Kutistumista ja siitä seuraavaa kappaleen vääntyilyä voidaan hallita myös eräänlaisen jäähdytyskehysen avulla. Jäähdytyskehys voi olla esimerkiksi puinen, metallinen tai muovinen jäykkä kehys, jonka päälle muovattu kappale asetetaan jäähtymään, ja kappale jäähtyy kehysen määräämään kokoon ja muotoon. Kappaletta voidaan kuitenkin joutua venyttämään tai painamaan kehysen päälle, jotta se säilyttäisi oikean muodon, ja tällöin kappaleeseen voi muodostua ei-toivottuja sisäisiä jännityksiä jotka voivat aiheuttaa ongelmia kappaleen loppukäytössä. [Fischer, 2003.]

Osakiteisten muovien kiteytymistä voidaan kontrolloida myös lämpökäsittelyn avulla. On esimerkiksi mahdollista saada kiteiden muodostuminen vähenemään kappaleen nopealla jäädyttämällä. Kiteiden muodostuminen, ja näin myös kutistuminen voi kuitenkin jatkua myöhemmin esimerkiksi korotetun lämpötilan vaikutuksesta. Tämä on usein ei-toivottua, mutta ominaisuutta voidaan käyttää myös hyödyksi esimerkiksi sovelluksissa, joissa halutaan muovisen kappaleen kiinnittyvän tiukasti paikalleen kutistumisen avulla. Jälkikutistuman osuutta taas voidaan vähentää hehkuttamalla (*annealing*), jolloin varmistetaan, että muovin kiteytyminen saadaan tapahtumaan kokonaisuudessaan jo muovausvaiheessa. Hehkutuksessa muovattavaa kappaletta pidetään lämpötilassa, jossa materiaalin kiteytyminen on voimakkainta, kunnes kiteytyminen on saatu loppuun, jolloin jälkikiteytymistä, eikä siis myöskään jälkikutistumista tapahdu. [Crystallinity in plastics, 2007 - 2010.] Kiteytyminen on voimakkainta lasisiirtymälämpötilan ja sulamislämpötilan puolella välissä [Shrinkage in plastic processing, 2007].

3. TUTKIMUS

3.1. Kutistumismittaus kansille

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää polypropeenista lämpömuovaamalla valmistettavien margariinirasian kansien jälkikutistumista neljän viikon ajan tutkittavan kansierän valmistuksen jälkeen. Aiemmin kansia valmistavan yrityksen toimesta kansien vanhenemiskäyttäytymistä ei ole juurikaan tutkittu, mutta vastaavanalaisia kutistumismittauksia on tehty erilaisille rasioille. Kansien kriittisten mittojen tarkka mittaaminen käytössä olevalla SmartScope-videomittalaitteella on melko haasteellista, johtuen esimerkiksi kansien vääntymisestä ja niiden helmojen leviämisestä ajan kuluessa. Lisäksi kansien kriittiset mitat tulee mitata kannen sisäosista, mikä lisää entisestään mittaamisen haasteellisuutta nykyisellä mittalaitteella. Edellä mainituista syistä nytkin mittauksissa jouduttiin huomioimaan mittalaitteen ja kansien ominaisuudet ja tekemään joitain kompromisseja. Mitattaviksi valitut dimensiot eivät esimerkiksi ole tässä tutkimuksessa juuri kannen sopivuuden kannalta kriittiset kannen sovitemitat, vaan kannen sisäpuolen tasaisen pinnan reunasta-reunaan mitat (kuva 18) Tämä siksi, että näiden mittojen mittapisteet saatiin laitteella näkymään selkeimmin ja näihin mittoihin ei kansien mahdollinen helmojen leviäminen todennäköisimmin tulisi vaikuttamaan. Kompromisseista huolimatta, näillä mitoilla saadaan jonkunlainen käsitys kansien jälkikutistumisesta ja myös muottipesäkohtaisia eroja kutistumiskäyttäytymisen suhteen saadaan esiin.

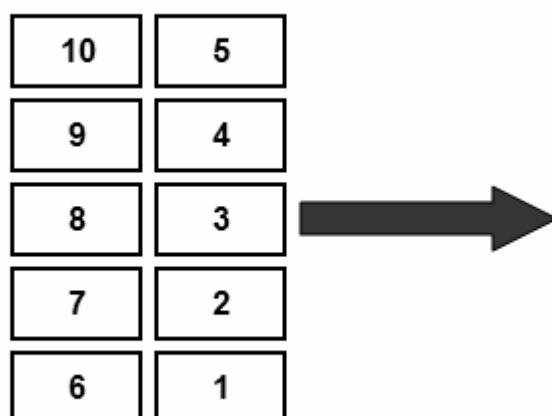
Vaikka margariinirasian kannet ovat tavallisesti värjättyjä (yleensä valkoisia), tutkimuksessa päädyttiin mittaamaan kirkkaiden kansien kutistumiskäyttäytymistä, sillä käytetyn mittalaitteen tarkkuus oli paras kirkkaiden kansien kohdalla. Kirkkaiden kansien raaka-aineena on käytetty 100 % HOMO-PP homopolymeeriä, jonka sulaindeksi on 2 g/10 min ja sulamislämpötila 164 - 168 °C. Kannet on lämpömuovattu kolmikerroksisesta kalvosta ja tässä tapauksessa niiden pintakerrokseen ei ole lisätty antistatteen.

Mitattavat kannet valmistettiin 21.9.2010 Hämeenlinnan Käikälässä Gabler-merkkisellä lämpömuovauskoneella. Käytetty muotoilupaine oli 5,5 bar ja muotoiluaika 1,70 sekuntia. Tuotantonopeus oli 17,9 iskua minuutissa. Muovikalvon lämmittämiseen käytetyt lämpötilat on taulukoitu (taulukko 3). Lämpömuovauslaitteen pöytien ylä- ja alalämpölevyissä on keraamisia vastuksia muovin lämmittämiseksi sen edetessä linjastolla. Muovi siis lämmitetään ylä- ja alalevyjen välissä. Suurin osa lämmityselementeistä on pitkittäisriveissä, joiden avulla muovilevyn lämpöä säädellään sen kulkusuunnassa. Lisäksi muovilevyn nähden poikkisuunnassa lämmönsäätelyyn käytetään poikkirivejä, jotka sijoittuvat pääsääntöisesti ylälämpölevyihin.

Taulukko 3: Mitattavan kansierän lämpömuovausprosessissa muovikalvon lämmittämiseen käytetyt lämpötilat.

Ylälämmöt	T (°C)	Alalämmöt	T (°C)	Ylä poikki-rivit	T (°C)	Ala poikki-rivit	T (°C)
1.	420	1.	385	1.	315	1.	360
2.	420	2.	365	2.	290	2.	320
3.	360	3.	320	3.	300		
4.	335	4.	320	4.	350		
5.	340	5.	310	5.	410		
6.	353	6.	310	6.	370		
7.	335	7.	325	7.	370		
8.	325	8.	335	8.	370		
9.	405	9.	330	9.	370		
10.	465	10.	380	10.	370		
11.	485	11.	395	11.	370		
				12.	310		
				13.	315		
				14.	315		

Kuvassa 15 on esitettyä malli 10-pesäisestä muotista. Muovikalvon etenemissuunta lämpömuovausprosessissa on kuvattu nuolella. Pesä 1-5 kutsutaan eturiviksi ja pesä 6-10 takariviksi. Muovilevyn edetessä muovattavaksi muotin kohdalle, ehtii eturivin pesien alue jäähtyä hieman enemmän kuin takarivi, koska eturivi siirtyy pois lämmityselementtien vaikutusalueelta muotin alle aikaisemmin kuin takarivi. Tätä pyritään kompensoimaan yllilämmittämällä eturiviä poikittaislämmöllä sen jäähtymisen verran.



Kuva 15: Mallikuva kansituotannossa käytettävästä monipesämuotista. Muovattavan kalvon etenemissuunta on esitetty nuolella.

Muottien lämpötiloja ei tuotannossa mitata suoraan muoteista, vaan muottilämpötilojen arvioimiseksi mitataan muoteista poistuvan jäähdytysveden lämpötila. Nämä arvot mitattavan kansierän tuotannossa olivat seuraavat:

Ylätyökalu (16 °C)

Alatyökalu (15 °C)

Pohjien jäähdytys (12,2 °C)

Kansia otettiin tuotannosta mittauksia varten yhteensä 100 kappaletta, eli kymmenen iskullista kymmenpesäisen muotin iskuja. Kannot järjesteltiin mittauksia varten iskuitain pinoihin, eli siten, että joka pinossa oli yksi kansi jokaisesta muottipesästä, eli yhteensä kymmenen kantta pinossa. Mitattavien kansien lisäksi otettiin vielä jokaiseen pinoon päälle ja alle ylimääräisiä kansia tukemaan mitattavia kansia, ja näin ehkäisemään niiden vääntyilyä neljän viikon mittausjakson aikana. Kansipinot numeroitiin ja ylimääräiset kannot merkittiin tussilla. Mitattavana oli siis 10 peräkkäisen iskun kannot. Peräkkäisiin iskuihin päädyttiin, jotta voitaisiin käyttää kymmenen kannen keskiarvoja muottipesäkohtaisen kutistumiskäyttäytymisen arvioimisessa. Prosessissa tapahtuvaa huojuntaa kutistumisarvoissa ajan suhteen ei siis tässä tutkimuksessa tutkittu.

Tutkimuksessa huomioitiin siis muottipesäkohtaiset erot kutistumiskäyttäytymisessä, ja vertailtiin eri pesien kansien kutistumista keskenään. Tähän päädyttiin siksi, että tiedetään kutistumiskäyttäytymisen olevan riippuvaista lämpömuovauksen muovauslämpötiloista, jäähtymisolosuhteista ja kalvon orientaatioista, jotka voivat vaihdella monipesäisen muotin eri alueilla. Tulosten perusteella voidaan ottaa myös kantaa siihen, miten kansien laadunvalvonnan tarkastusotannot tulisi jatkossa valita.

3.2. Mittauslaitteisto ja -ohjelma

Kansien dimensioiden mittaamiseen käytettiin kansia valmistavan yrityksen laboratorioskäytössä olevaa SmartScope Zip600 -videomittalaitetta (kuva 16) ja OGP:n MeasureMind Plus -ohjelmistoa. Laitteiston toiminta perustuu valon ja varjon rajapinnan mittaamiseen suurilla mittatarkkuuksilla. Videomittalaitteessa on digitaalinen värikamera CCD-kennolla ja laitteen teknisissä tiedoissa mainittu mittatarkkuus on X- ja Y-akseleiden suunnassa $U_2 = (4,0 + \frac{8L}{1000})\mu m$ ja Z-akselin suunnassa $U_1 = (4,0 + \frac{7L}{1000})\mu m$. Tässä L tarkoittaa mitattua pituutta millimetreissä. Mittalaite ilmoitti mittaustulokset 0,001 mm tarkkuudella, mutta tulosten käsittelyssä tulokset on pyöristetty 0,01 mm tarkkuuteen.



Kuva 16: Mittauksissa käytetty SmartScope Zip600-videomittalaite.

Jokaiselle muottipesälle tehtiin oma mittausohjelmansa, jotta mitatessa oli mahdollista huomioida mahdollisimman onnistuneesti kansien pesäkohtaiset erot kutistumisen lisäksi myös muotojen yksityiskohdissa. Ohjelmaa tehdessä voitiinkin huomata joidenkin pesien välillä melko merkittäviä eroja esimerkiksi mitattavien reunojen tasaisuudessa ja suorudessa.

SmartScopella mitattaessa kannet tuli asettaa tarkasti mittauspöydälle siten, että jokaisessa mittauksessa ne olivat ohjelman koordinaatteihin nähden samassa asennossa ja sijainnissa. Tässä apuna käytettiin kahdenlaisia kiinnittimiä. Toiset olivat lasisessa mittauspöydässä oleviin reikiin asetettuja tappeja (3 kpl), joiden avulla kannet saatiin pysymään oikeassa sijainnissa x- ja y-tasoissa. Toiset kiinnittimet olivat rautalangasta ja kuumaliimasta tehtyjä ”sauvoja” kuva, jotka pitivät kannet paikoillaan z-suunnassa.

Mittalaite ohjelmoitiin löytämään kansista mittapisteet valituilta kohdilta siten, että mittapiste sijaitsi kannessa olevan reunaviivan kohdalla. Mittapiste sijaitsi tietyllä, mahdollisimman tarkasti määritellyllä kapealla alueella, jonka koordinaattien mukaan mittausohjelma laski sijainnin keskiarvon ja etäisyyden toiseen valittuun mittapisteeseen, eli valitun leveys-, pituus- tai ristimitan kannesta.

Leveys-, pituus- ja ristimittojen lisäksi kansista mitattiin myös kannen tasaisen osan seinämäpaksuuksia viideltä eri alueelta. Mittaukset suoritettiin Magna-Mike -nimisellä laitteella (kuva 17), jossa kansi sijoitettiin magneettisen mittakärjen ja metallisen pallon väliin ja laite mittasi kannen paksuuden pallon ja kärjen välisenä etäisyytenä.



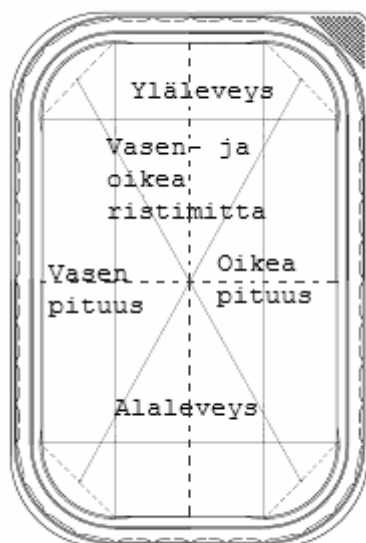
Kuva 17: Kansien seinämäpaksuuksien mittaamisessa käytetty Magna-Mike -mittalaite.

Seinämävahvuuksien mittaamisen yhteydessä kannet myös punnittiin. Nämä mittaukset suoritettiin dimensiomittausten loputtua, sillä tiedettiin kutistumiskäyttäytymisen olevan varsin merkityksetöntä seinämävahvuuksiin ja massaan. Näiden mittausten perusteella onkin tarkoituksena vertailla vain paksuuden ja massan pesä- ja aluekohtaisia eroja, ei kutistumiskäyttäytymistä. Seinämävahvuusmittausten tulokset saatiin tarkkuudella 0,01 mm ja kansien punnitsemisessa käytetyn vaa'an tarkkuus oli 0,01 g.

3.3. Mittausten eteneminen

3.3.1. Dimensiomittaukset

Kansien kutistumiskäyttäytymistä tutkittiin neljän viikon ajan, yhteensä kuusi kertaa suoritetuilla mittauksilla. Mitattavia kansia oli sata kappaletta, eli kymmenen iskua kymmenpesäisellä muotilla. Muottipesiä tutkittiin siis erikseen, koska pesäkohtaiset erot olivat odotettavissa. Kansista mitattiin leveydet ja pituudet kolmesta kohdasta sekä molemmat ristimitat (kuva 18). Tulosten käsittelyssä päädyttiin kuitenkin jättämään huomioimatta pituuden ja leveyden keskeltä kantta mitatut mitat erinäisten mittauksissa ilmenneiden ongelmien vuoksi. Ristimittojen mittaamiseksi päädyttiin mittauspisteiksi valitsemaan leveyden ja pituuden mittauspisteiden puoliväli, koska tarkan pisteen löytäminen täsmälleen kannen kulmasta olisi ollut erittäin vaikeaa, ellei jopa mahdotonta.



Kuva 18: Kansien kutistumismittauksissa mitatut mitat. Katkoviivalla korostettuna tulosten käsittelystä pois jätetyt mitat.

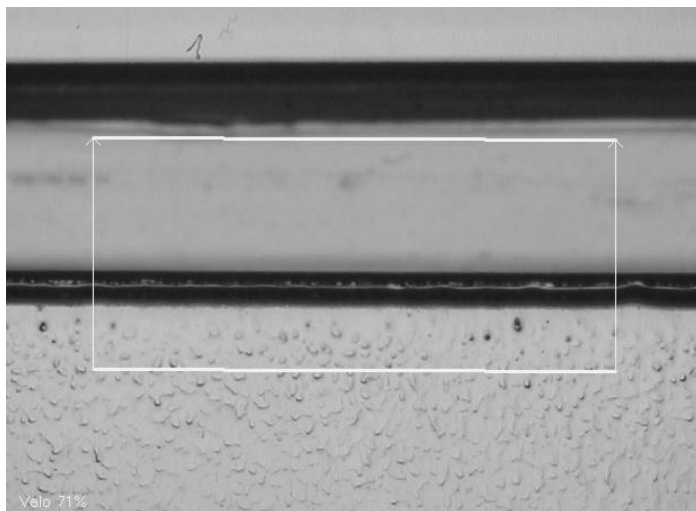
Mittauskertojen aikavälit valittiin siten, että alussa mittauksia olisi selvästi tiheämmin kuin lopussa, sillä teorian mukaisesti tiedossa oli, että jälkikutistuminen tulee todennäköisesti hidastumaan ajan kuluessa. Ensimmäinen mittaus suoritettiin noin tunnin kuluttua kansien noutamisesta tuotantopisteeltä. Tällöin kannet olivat ehtineen jäähtyä. Seuraavat mittaukset suoritettiin taulukon mukaisesti tietyn ajan kuluttua ensimmäisestä mittauksesta. Esimerkiksi toinen mittaus suoritettiin vuorokauden kuluttua ensimmäisestä mittauksesta ja viimeinen mittaus neljän viikon kuluttua mittauksen aloittamisesta. Taulukossa 4 on esitetty mittauksen suoritusajankohdat. Mittauksen välillä kansia säilytettiin samassa tilassa mittalaitteen kanssa edellä mainitunlaisissa pinoissa. Mittaushuoneen lämpötila oli noin 23 °C ja ilmankosteus noin 30 %.

Taulukko 4: Suoritettujen kutistumismittauksen ajankohdat.

Mittauskerta	Päivämäärä / Kulunut aika ensimmäisestä mittauksesta
1.	21.09.2010 / heti
2.	22.09.2010 / 1 vrk
3.	24.09.2010 / 3 vrk
4.	28.09.2010 / 7 vrk
5.	05.10.2010 / 14 vrk
6.	19.10.2010 / 28 vrk

Mittauksiin kului aikaa noin 1,5 – 2,5 tuntia riippuen mittausohjelman etenemisen sujuvuudesta. Sujuvuuteen vaikutti esimerkiksi kansien mittauspöydälle asettelun tarkkuus sekä kansista mitattavien reunojen tasaisuuden vaihtelevuus ja pienet muutokset reunoissa kutistumisen myötä. Joidenkin kansien kohdalla reunoissa oli enemmän epätasai-

suutta kuin toisten ja joissain reunaviivoissa näkyi myös ”haamureunoja” kuten kuvassa 19 tumman alueen keskellä oleva vaalea raja. Ylimmän rajan pisteitä mitattiin, mutta mittalaite saattoi joissain reunoissa olettaa mittapisteen sijaitsevan ”haamurajalla”, jolloin mittaustilanteessa vaadittiin tarkkuutta ja kyseisen mittauksen uusimista. Myös kansien kutistuminen mittausten välillä saattoi vaikeuttaa oikeiden mittapisteiden löytämistä.

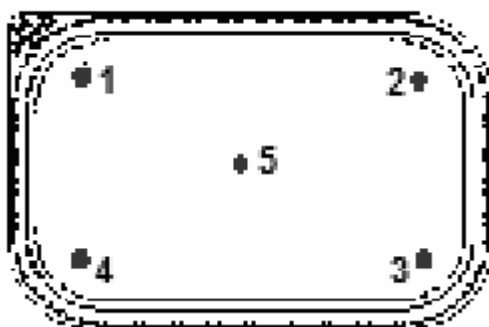


Kuva 19: Mittausnäkökuvaa kannen mitattavasta reunasta. Keltaisella laatikolla korostetun tumman linjan keskellä näkyvä vaaleampi haamuviiva häiritsi mittauksia mittalaitteen etsiessä mittapisteitä myös tältä viivalta.

Mittausten aikana kansissa tapahtui silminnäkettäviä muodonmuutoksia (vääntyilyä yms.) hyvin vähän. Kansien säilyttäminen edellämämainituissa pinoissa saattoi siis hyvinkin vähentää kansien vääntyilyä ja reunojen pullottamista, sillä yleensä kansien vääntyily on merkittävä ongelma kansituotannossa.

3.3.2. Seinämänvahvuus ja massa

Seinämänvahvuusmittauksiin ja punnittavaksi valittiin satunnaisvalinnalla iskujen 1, 4, 7 ja 10 kannet. Tutkittavana oli siis yhteensä 40 kappaletta kansia. Mittausalueita, joilta seinämänvahvuudet mitattiin, valittiin kuvan 20 mukaisesti viisi kappaletta; kannen kulma-alueilta ja keskeltä.



Kuva 20: Kannen alueet, joilta seinämävahvuudet mitattiin.

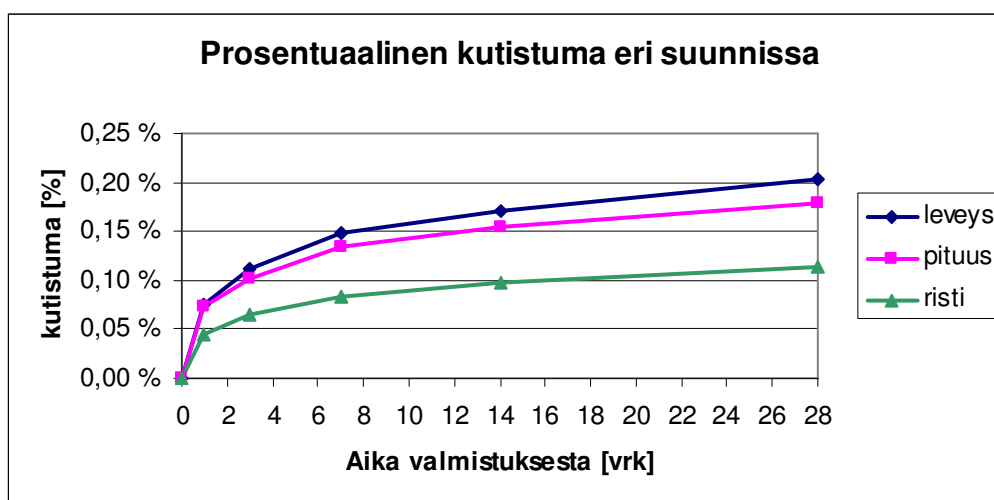
Seinämävahvuuksia ei mitattu tarkasti tietyistä pisteistä, vaan tietyiltä alueilta, joiden seinämävahvuuksien keskiarvot taulukoitiin. Seinämävahvuuksien mittaamisen jälkeen kannet punnittiin ja myös punnitustulokset taulukoitiin.

3.4. Mittaustulokset ja niiden käsittelyä

Tulosten käsittelyssä käytetään pesäkohtaisia keskiarvoja kuvassa esitetyistä mitoista, eli ylä- ja alaleveys, vasen ja oikea pituus sekä vasen ja oikea ristimitta (kuva 18). Prosentuaalisen kutistuman laskemiseksi on käytetty aiemmin luvussa 2.3.3.4. esitettyä kaavaa (1). Mittausten tulokset on esitetty taulukoituna liitteessä 1.

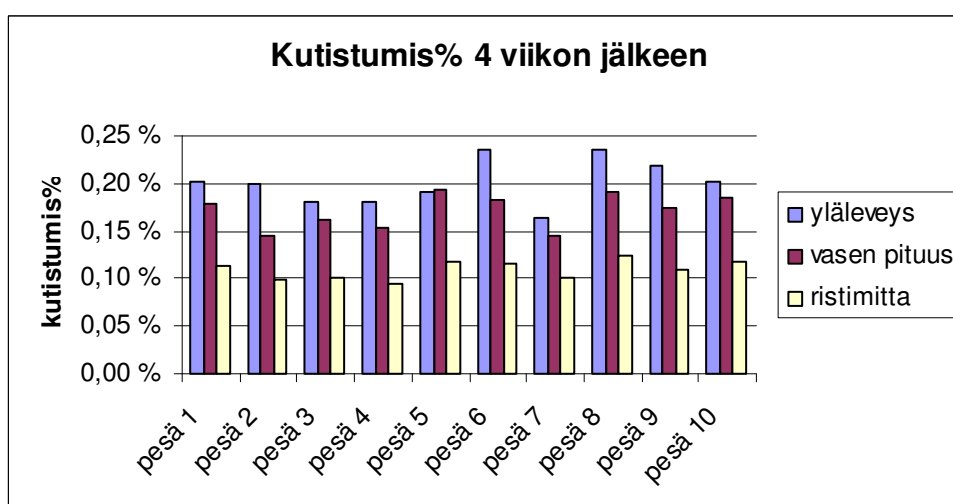
3.4.1. Kutistuma eri suunnissa

Mittaustulosten perusteella samansuuntaiset mitat kutistuivat lähes täysin samassa tahdissa ja saman verran, joten tuloksia käsiteltäessä ei ole tarpeen käsitellä erikseen esimerkiksi yläleveyttä ja alaleveyttä. Eri suunnissa tapahtuvan kutistumisen suhteen eroja kuitenkin odotetusti näkyi. Kuvan 21 esittämässä kuvaajassa nähdään kutistumiskäyttäytymisen vaihtelu eri suunnista mitattuna, muottipesän 1 kansissa. Kuvaajassa nähdään myös kutistumisen aikariippuvuus käyrän muodosta kaikissa suunnissa: ensimmäisten kahden vuorokauden aikana kutistuman osuus on lähes puolet neljän viikon aikana tapahtuneesta kutistumasta. Jälkikutistuminen on siis selvästi nopeampaa ensimmäisten vuorokausien aikana kansien kappaleen valmistuksesta ja mitä enemmän aikaa kuluu, sitä hitaampaa kutistuminen on. Esimerkiksi laadunvalvonnassa tehdyissä mittauksissa kannattaakin ottaa huomioon suuri kutistumisnopeus ensimmäisinä vuorokausina valmistuksen jälkeen.



Kuva 21: Yhden muottipesän kansien prosentuaalinen kutistuma eri suunnissa.

Kuvassa 22 nähdään sama trendi pylväsdiagrammin muodossa kaikkien pesien osalta. Ainoastaan pesän 5 kansien pituusmitta on kutistunut hieman enemmän kuin leveysmita. Muiden pesien kohdalla kutistuma on suurin leveysmitalle ja pienin ristimitalle.



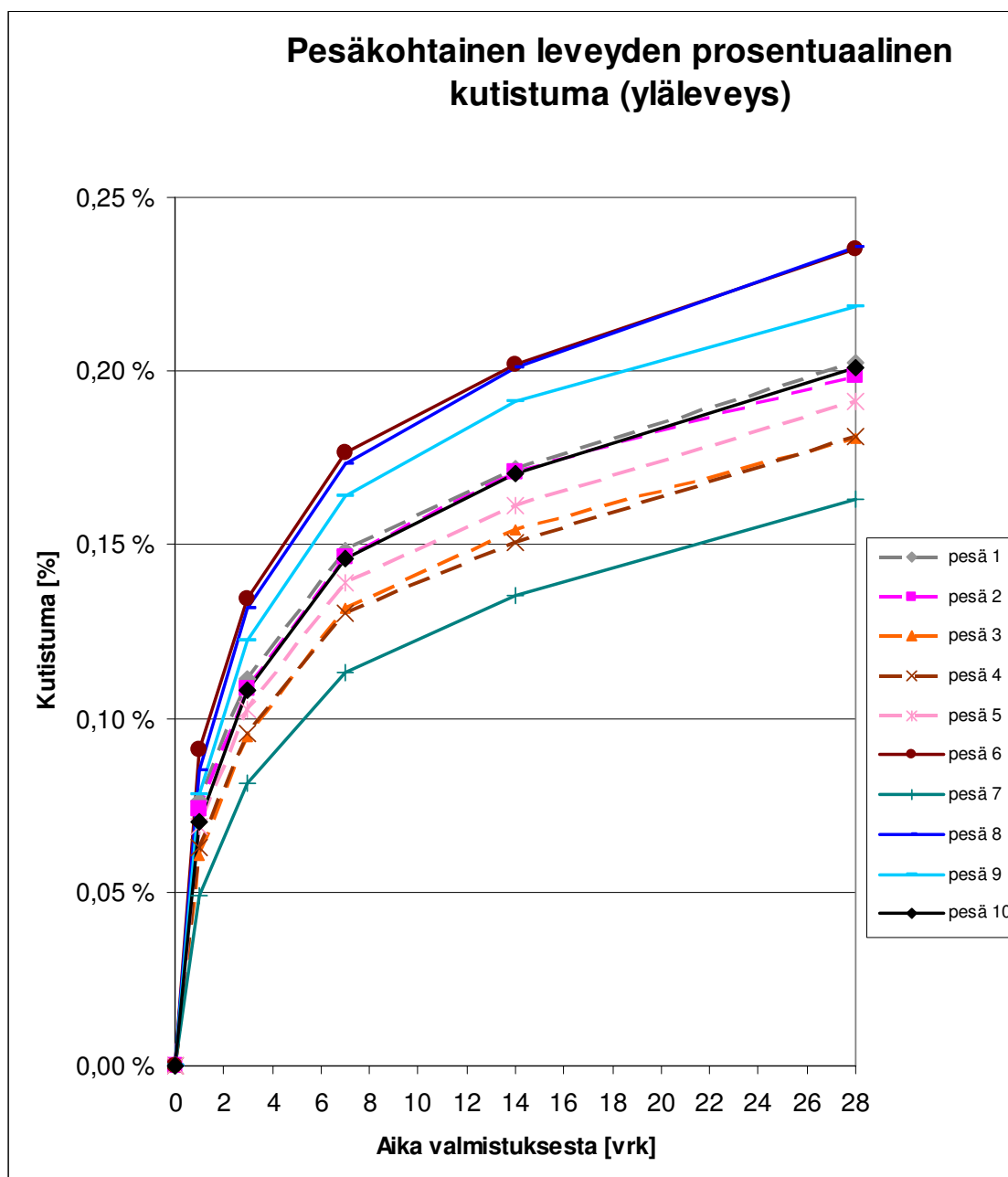
Kuva 22: Pylväsdiagrammi kansien erisuuntaisesta kutistumista kaikkien muottipesien osalta.

Teorian mukaan kutistumiskäyttäytyminen on suunnasta riippuvaa siten, että kutistuminen on suurinta suurimman orientaation suunnassa. Kalvon orientoituminen ekstruusion aikana aiheuttaa suurempaa kutistumista ekstruusion suunnassa kuin sitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Ekstruusiosta syntyneestä orientaatiosta lähes kaikki on ekstruusion suuntaista ja poikittaissuuntaista orientaatiota pyritään kansituotannossa välttämään. Mittausten perusteella kansien leveysmitta näyttäisi kuitenkin kutistuvan prosentuaalisesti enemmän kuin pituusmitta, vaikka pituusmitta onkin aiemmin esitetyn kuvan 15 mukaan ekstruusion suuntainen. Tämänlainen käyttäytyminen on kuitenkin selitettävissä, sillä prosentuaaliset erot kutistumassa eivät ole erityisen suuria. Kansien suurempaan kutistumaan leveysuunnassa voi vaikuttaa useampikin tekijä. Eräänä syynä voi esimerkiksi olla levyn poikittaissuuntainen kiristäminen lämpömuovauslinjalla lämpö-

laajenemisesta johtuvan roikkuman poistamiseksi. Myös muotoiluvaiheessa muovia venytetään tuotteessa enemmän poikittaissuunnassa kuin pituussuunnassa. Erityisesti kansituotannossa tällä venytyksellä on merkitystä, sillä muotoilussa ei käytetä mekaanista venytystä (esim. puslinta), kuten profiililtaan syvempien tuotteiden syvävedossa. Kansien ristimitan kutistuminen on tulosten perusteella selvästi vähäisempää kuin leveyden ja pituuden, sillä ristikkäissuuntaista orientaatiota ei synny merkittävästi ekstruusiossa eikä muovauksen aikaisessa venytyksessä.

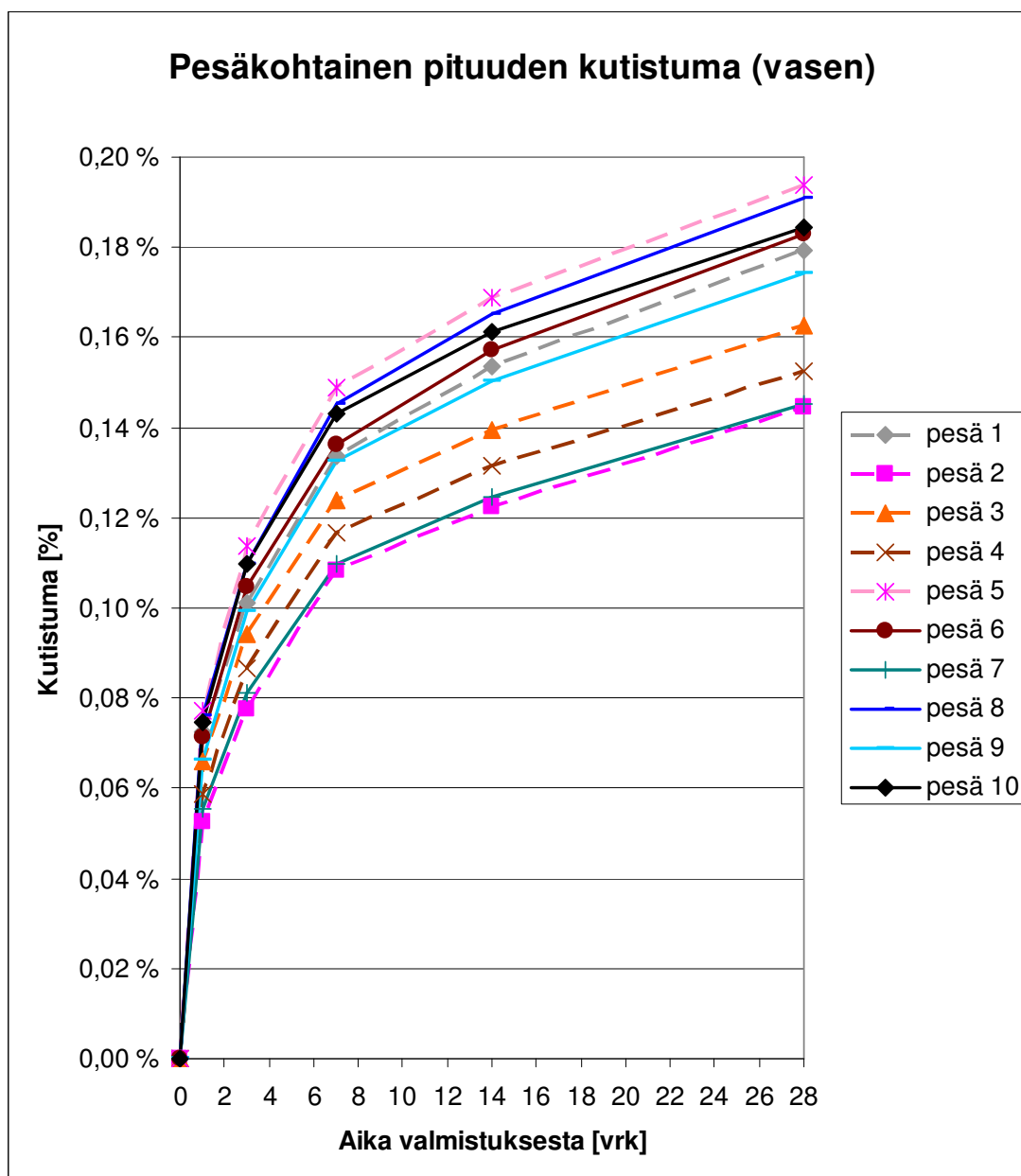
3.4.2. Kutistuman pesäkohtainen tarkastelu

Kuvien 23, 24 ja 25 esittämässä kuvaajissa nähdään jälkikutistuman pesäkohtaiset erot kannen yläleveyden, vasemman puoleisen pituuden ja toisen ristimitan osalta. Kuvaajiin on piirretty katkoviivalla muotin eturiviin kuuluvien pesien (1-5) ja jatkuvalla viivalla muotin takariviin kuuluvien pesien (6-10) kannet, jotta nähtäisiin kuinka suuri vaikutus etu- ja takarivien mahdollisilla lämpöeroilla on kutistumaan. Kuten edellä jo mainittiin, on eturivin pesien kohdalle lämpömuovauksessa kulkenut muovilevyn osa siirtynyt pois lämmityselementtien vaikutusalueelta aiemmin ja näin ollen ehtinyt jäähtyä hieman viileämmäksi kuin takarivin pesien alue. Lämpötilaeroa on kuitenkin pyritty tasoittamaan eturivin alueen yllilämmittämällä.



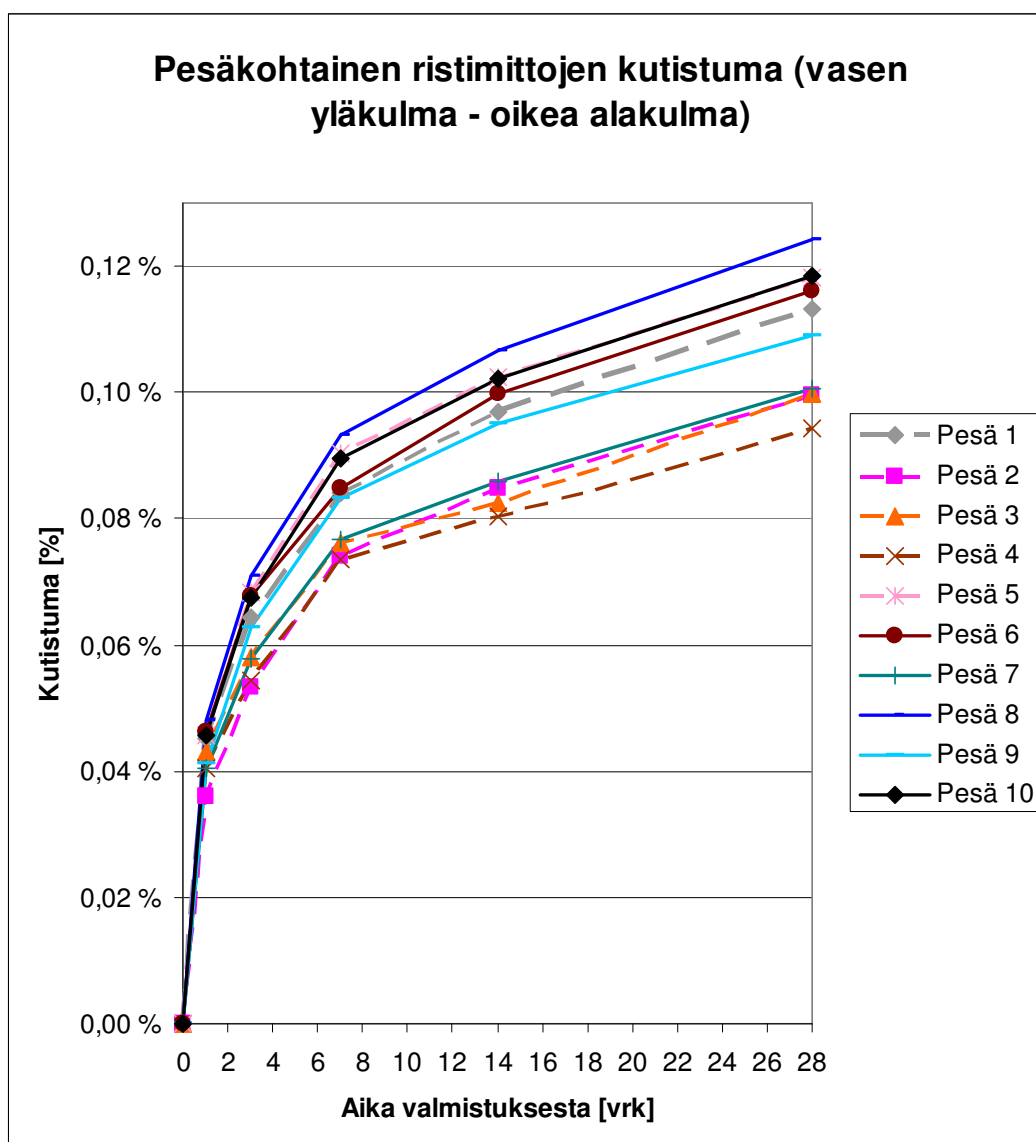
Kuva 23. Kansiens yläleveyden kutistuman pesäkohtaiset kuvaajat

Kansiens yläleveyden kohdalla neljän viikon mittausten jälkeen kutistuman ero on suurimmillaan 0,08 % pesien 8 (ja 6) ja 7 välillä. Millimetreissä tämä ero tarkoittaa sitä, että pesän 8 ja 6 kannet ovat kutistuneet keskimäärin 0,06 mm enemmän kuin pesän 7 kannet. Eturivin pesien kannet näyttäisivät kutistuneen keskimäärin vähemmän kuin takarivin pesien kannet, ainoan poikkeuksen muodostaa pesä 7, jonka kannet ovat kutistuneet vähiten.



Kuva 24. Kansien vasemman puoleisen pituuden kutistuman pesäkohtaiset kuvaajat.

Kuvan 24 kuvaaja esittää kansien vasemman puoleisen pituuden pesäkohtaista kutistumista. Suurin ero neljän viikon jälkeen oli pituuden prosentuaalisen kutistuman kohdalla pesien 5 (ja 8) ja 2 välillä. Prosenteissa tämä ero on 0,05 % ja millimetreissä 0,06 mm. Pituuden kutistuman kohdalla erot etu- ja takarivien pesien välillä näyttäisivät olevan pienempiä, kuin leveyden kohdalla, mutta kuvaajan käyristä voidaan kuitenkin nähdä, että eturivin kannet ovat kutistuneet keskimääräisesti hieman vähemmän kuin takarivin kannet.



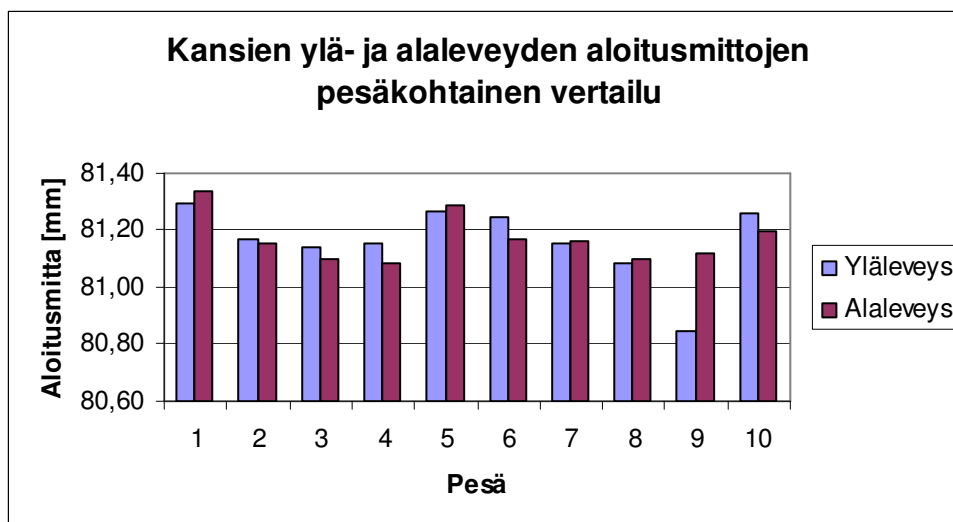
Kuva 25. Kansien vasemman ristimitan kutistuman pesäkohtaiset kuvaajat.

Ristimittojen kohdalla prosentuaalisen kutistuman pesäkohtaisia eroja voidaan nähdä kuvassa 25. Suurin ero kutistumassa oli neljän viikon jälkeen pesien 8 ja 4 välillä. Prosentteina ero näiden pesien välillä oli 0,03 % ja millimetreinä 0,04 mm. Myös ristimitan kutistumiskäyttäytymisessä voidaan nähdä eturivin pesien kutistuneen keskimäärin vähemmän kuin takarivin.

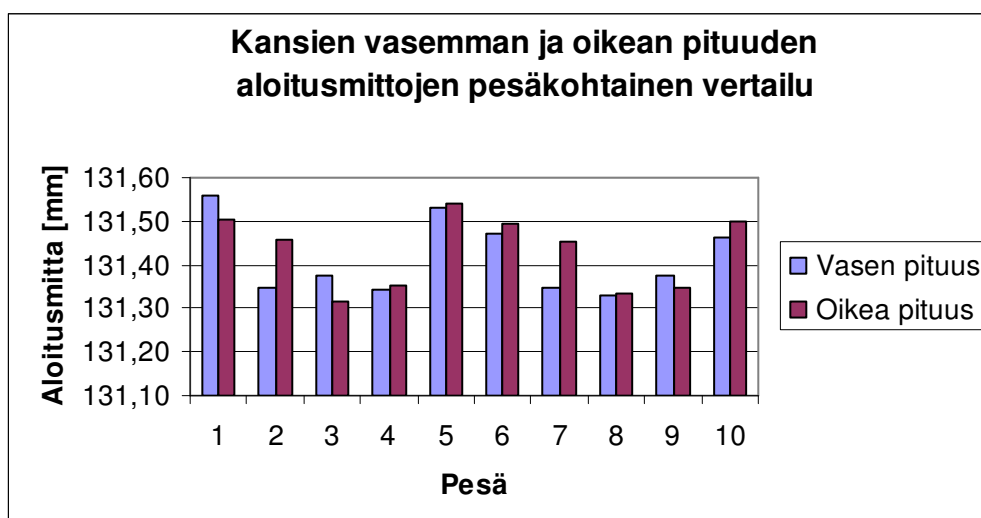
Edellä esitettyjen kuvaajien perusteella pesäkohtaisia eroja on kaikissa suunnissa nähtävissä, mutta kutistuman pesäkohtaiset erot ovat ainakin näiden mittausten perusteella suurimmillaan kansien leveyden kohdalla ja pienimmillään ristimittojen kohdalla. Tarkastelemalla kuvaajia lähemmin, esimerkiksi ensimmäisen päivän kohdalta, huomataan kutistumistrendin olevan samansuuntainen kuin neljän viikon kuluttuakin, eli eturivin kansien kutistuminen on vähäisempää (hitaampaa) kuin takarivin kansien, muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta.

3.4.3. Pesäkohtaiset aloitusmitat

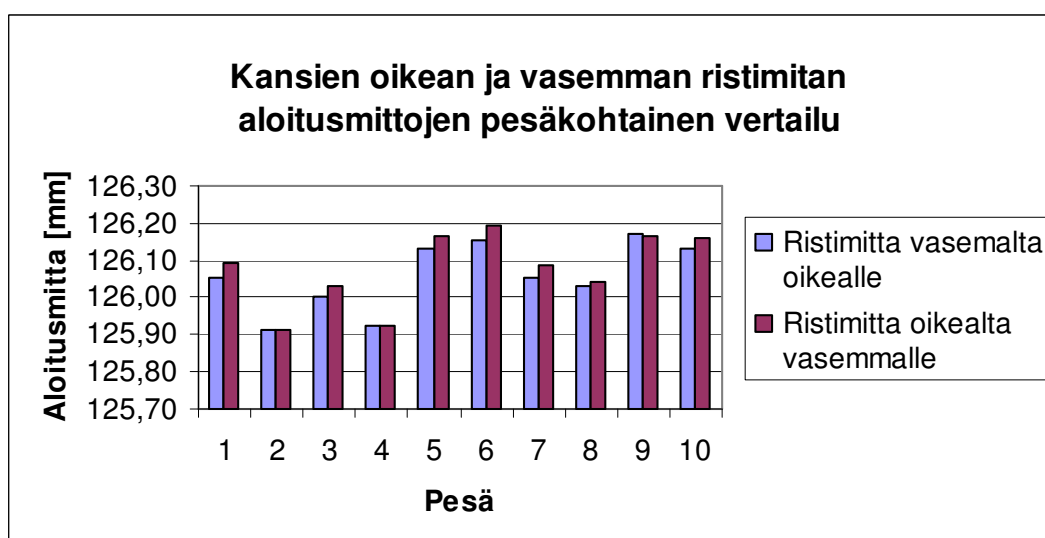
Kutistumiskäyttäytymisen lisäksi mittaustuloksista nähdään myös muita mielenkiintoisia piirteitä. Kuvissa 26, 27 ja 28 on esimerkiksi pylväsdiagrammit, joiden avulla on vertailtu kansien eri mittoja ensimmäisten mittaustulosten (aloitusmitat) perusteella. Näin nähdään, kuinka paljon eri pesien kansissa voi olla eroja jo pelkästään kansien muodossa. Esimerkiksi kuvassa 26 nähdään, että pesän 9 kannen yläleveys on selvästi alaleveyttä pienempi jo ennen varsinaisen jälkikutistumisen alkamista. Tämä oli nähtävissä jo mittausohjelmaa eri pesille tehtäessä, ja sama ilmiö toistui kaikissa pesän 9 kansissa. Muiden pesien kohdalla erot ovat pienempiä ja vaihtelevat siten, että välillä suurempi mitta on yläleveys ja välillä alaleveys. Pituusmittojen kohdalla (kuva 27) pesien 2 ja 7 kohdalla vasemman ja oikean puoleiset pituudet poikkeavat selkeämmin toisistaan kuin muut. Ristimittojen kohdalla (kuva 28) ei ole nähtävissä yhtä merkittäviä eroja. Kaikista kuvista on nähtävissä, että eri pesien väliset kokoerot voivat olla suhteellisen suuria jo ennen jälkikutistuman vaikutusta.



Kuva 26: Kansien leveyden pesäkohtaisten aloitusmittojen vertailua.



Kuva 27: Kansien pituuden pesäkohtaisten aloitusmittojen vertailua.



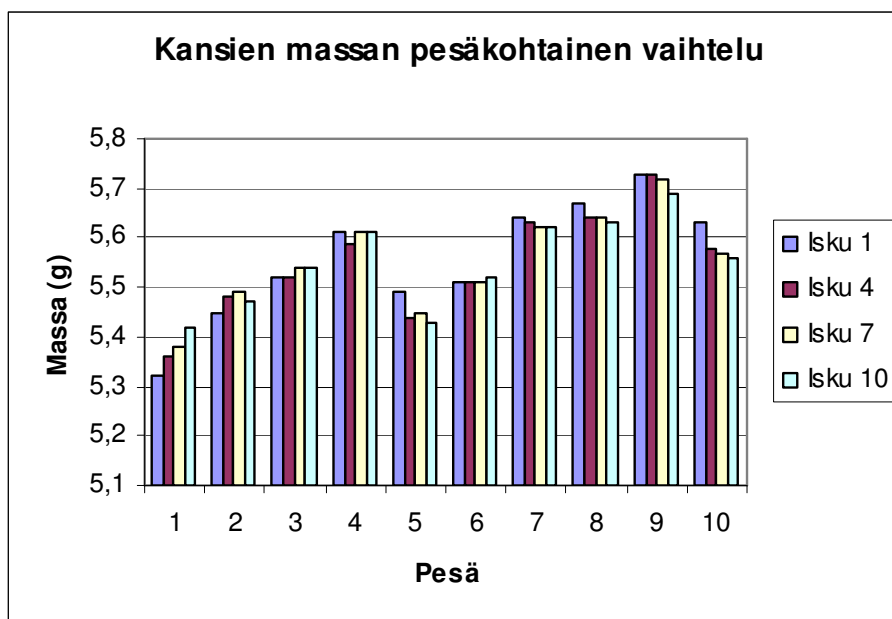
Kuva 28: Kansien ristimittojen pesäkohtaisten aloitusmittojen vertailua.

Pienet erot samansuuntaisten mittojen välillä voivat johtua esimerkiksi mittalaitteen epätarkkuudesta. Suurempiin eroihin syyt löytyvät todennäköisesti muotin pesistä, jotka ovat mittausten perusteella keskenään erikokoisia ja jopa erimuotoisia. Kaikissa kansituotannon lämpömuovauskoneissa käytettävissä muoteissa on eroja myös toisiinsa verrattuna. Muotit voivat olla eri-ikäisiä tai käyttöaste voi olla eri, jolloin muotit ovat kulumineet erilailla ja siten myös muovatut tuotteet ovat erilaisia eri muoteilla valmistettuina. Myös muottipesät voivat kulua keskenään erilailla ja muottipesät ovatkin vaihdettavia osia muottityökalussa.

3.4.4. Massat ja seinämävahvuudet

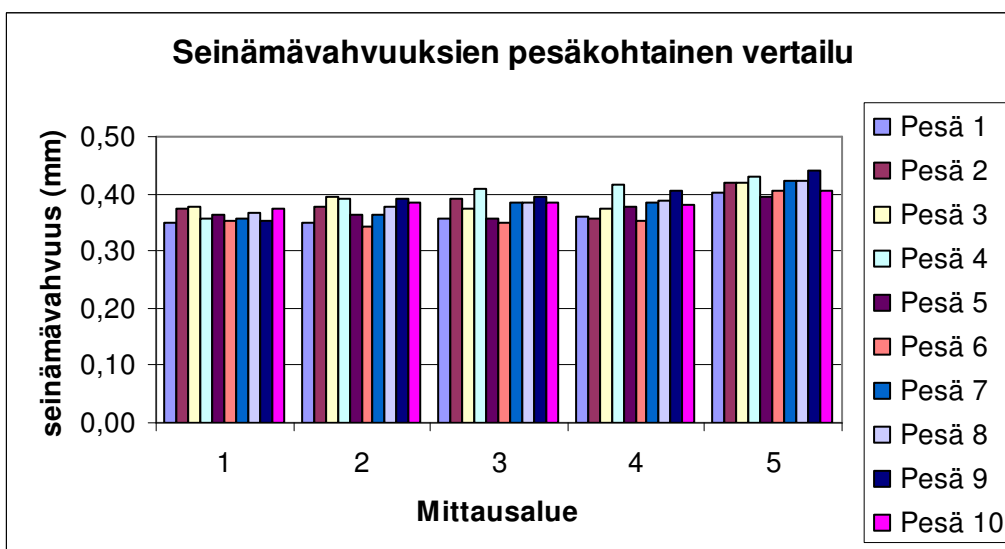
Mittauksista saadut seinämävahvuudet ja massat on talulukoitu (liite 2). Kuvassa 29 on pylväsdiagrammi kansien massoista. Diagrammista nähdään selvästi, että esimerkiksi

pesien 1 ja 5 kannet ovat muita kansia kevyempiä ja pesän 9 kannet ovat muita painavampia. Sama piirre on nähtävissä kaikkien iskujen kohdalla.



Kuva 29: Pylväsdiagrammi kansien massan pesäkohtaisesta vaihtelusta iskuissa 1, 4, 7 ja 10.

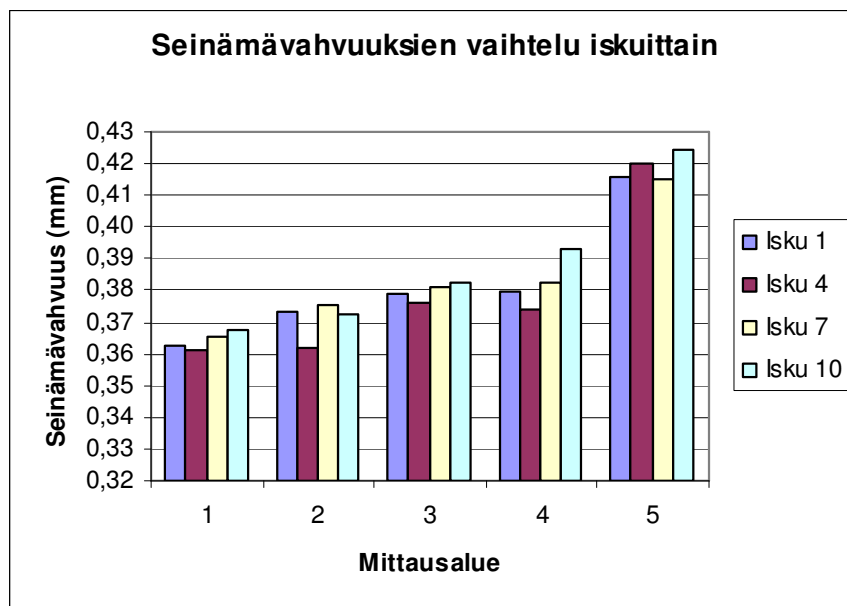
Syynä eri pesien kansien massojen eroihin on todennäköisesti jo aiemmin havaitut muottipesien kokoerot, mutta mahdollisesti myös muovattavan muovilevyn erilainen materiaali-jakauma muotin eri alueilla. Kuvassa 30 vertaillaan kansien seinämävahvuuksia eri pesien kesken, ja myös tämän diagrammin perusteella voidaan nähdä että esimerkiksi pesän 9 kannet ovat keskimäärin hieman paksumpia kuin muut ja pesän 1 kannet hieman ohuempia.



Kuva 30: Kansien seinämävahvuuksien pesäkohtainen vertailu eri mittausalueilla.

Kuvassa 31 on pylväsdiagrammi kansien seinämävahvuuksista myös iskuittain eri mittausalueilla. Diagrammista nähdään selvästi, että kansien paksuin alue on kannen kes-

kellä, alueella 5. Ohuin alue näyttäisi olevan alueella 1, eli kulmassa, jossa kansissa on ns. avauslippa. Avauslipan alueelle on siis todennäköisesti jakautunut materiaalia alueelta 1, joka on tämän seurauksena jäänyt ohuemmaksi.



Kuva 31: Seinämvahvuuksien vaihtelevuus iskuittain.

Kansista löytyy siis pesäkohtaisia eroja myös massan ja seinämvahvuuksien suhteen. Nämä eivät varsinaisesti vaikuta kansien kutistumisominaisuuksiin, mutta havainto vahvistaa käsitystä siitä, että kansissa on osittain hyvinkin selviä pesäkohtaisia eroja niin dimensioiden kuin massan ja seinämvahvuudenkin suhteen. Seinämvahvuudet vaihtelevat kansien eri osissa ja näin ollen voivat osaltaan altistaa kansia differentiaaliselle kutistumalle ja myös vääntyilylle.

4. CASE: KONENÄKÖSYSTEEMIN SUUNNITTELU KANSIEN LAADUNVALVONTAAN

Tässä luvussa käydään läpi luvussa 2.2. käsiteltyjä konenäkösystemin suunnitteluun liittyviä asioita kansituotannon tapauksessa. Seuraavaksi eritellään siis tehtävä sekä kuvaillaan mittauksen kohteena oleva kappale ja kuvaillaan muita laadunvalvontaan suunniteltavan systemin vaatimuksia, rajoituksia ja käyttöolosuhteita. Kuitenkin lopullisen systemin suunnittelun ja toteuttamisen hoitaa konenäköasiantuntija yhdessä kansituotannon avainhenkilöstön kanssa. Lopuksi esitellään lyhyesti erilaisten vaihtoehtoisten konenäkösystemien perustietoja ja toimintaperiaatteita. Tietoja erilaisista ratkaisuvaihtoehtoista vaihtoehtoista on saatu eri konenäköyritysten asiantuntijoilta. Tehtävän erittelyssä olevat taustatiedot kansista ja kansituotannosta on saatu haastattelemalla kansituotannon asiantuntijaa kansia valmistavassa yrityksessä.

4.1. Tehtävän erittely

Tietoa kansituotannosta

Kannet valmistetaan lämpömuovaamalla ja niitä tuotetaan yli 200 000 kappaletta päivässä tuotantolinjaa kohden. Kansituotannossa käytettävät lämpömuovauskoneet ovat kaikki eri-ikäisiä, jolloin niiden lämmitysominaisuudet eroavat toisistaan. Myös käytettävät muotit ovat keskenään eri-ikäisiä ja niissä käytetyt muottimateriaalit ja näin ollen myös lämmönjohtavuuden arvot voivat vaihdella. Koska näillä tekijöillä on oma vaikutuksensa valmistettavien kansien kutistumiskäyttäytymiseen, on selvää että eri koneilla ja eri muoteilla valmistettujen kansien kutistumiskäyttäytyminen voi siis vaihdella toisistaan huomattavastikin. Kannet valmistetaan positiivimuotilla paineilmaa käyttäen. Kannet ovat profiililtaan suhteellisen matalia, joten erillisiä venytystyökaluja ei tarvita, kuten esimerkiksi profiililtaan syvempien rasioiden valmistuksessa tarvitaan. Kannet valmistetaan monipesämuoteilla, jolloin lämmitysolosuhteissa ja näin ollen myös kutistumiskäyttäytymisessä on usein pesäkohtaisia eroja. [Karjalainen, 2010]

Kansituotannon raaka-aineina käytetään polypropeenin homo- ja kopolymeerejä. Nämä raaka-aineet käyttäytyvät muotoiluvaiheessa erilailla. Yleisesti ottaen polypropeeni yksi hankalammista lämpömuovattavista materiaaleista, sillä se vastustaa venytystä ja vaatii muotoutumiseen näin ollen enemmän energiaa, eli lämpöä. Tämän seurauksena polypropeeni vaatii myös pidemmän jäähdytysajan. Kannet valmistetaan kolmikerroskalvosta, jonka ulkokerroksissa voidaan lisäaineena käyttää esimerkiksi antistatteen. Muovattavien muovikalvojen ekstruusio tapahtuu kansivalmistajan toimesta. Ekstrudoitu levy

ajetaan ensin rullalle, jonka jälkeen lämpömuovaus tapahtuu off-linena. Levyrullien varastointiajat voivat vaihdella esimerkiksi siten, että osa rullista voi olla täysin jäähtyneitä lämpömuovaukseen päätyessään, ja osa rullista voi olla vielä lämpimiä, varsinkin sisäosistaan. Tämä tulisi ottaa huomioon esimerkiksi lämpömuovausprosessin lämpötilaparametrien asetuksissa, mikä on varsin haasteellista. Lämpömuovaus- ja ekstruusioprosesseissa ylijäänyt kalvo murskataan rouheeksi ja käytetään uudelleen ekstruusiassa. Kierrätysrouheen sekoitussuhteita ja käyttömääriä ei valvota erityisellä tarkkuudella, mutta kierrätysrouheen määrä vaihtelee välillä 35 - 60 % ja rouheen seassa voi kansimateriaalin lisäksi olla jonkin verran myös rasiarouhetta. [Karjalainen, 2010.] Muovin ominaisuudet, kuten esimerkiksi lämpeneminen, muovautuvuus, jäähtyminen ja kutistuminen, muuttuvat seossuhteen ja käytetyn rouheen mukaan. Kansille tehdyn kutistumistutkimuksen yhteydessä suoritetuissa mittauksissa havaittiin, että kansien dimensioissa oli jonkin verran pesäkohtaisia eroja jo ennen jälkikutistuman vaikutusta.

Konenäkösysteemillä tavoiteltava hyöty

Tavoitteena kansituotantoon konenäkösystemillä on tehostaa kansien laadunvalvontaa kansien mittaamisen osalta. Konenäkösystemillä tavoiteltavat edut perustuvat konenäön suurempaan luotettavuuteen ja nopeuteen, kuin mitä nykyisellä laadunvalvonnalla on voitu saavuttaa. Mittaukset halutaan suorittaa tuotannon ohessa siten, ettei mittaaminen aiheuta merkittävää lisätyötä tai vie liikaa aikaa. Tällä hetkellä kansia ei laadunvalvonnassa mitata, vaan kansien laadunvalvonta keskittyy lähinnä silmämääräiseen virheiden havaitsemiseen sekä kansien vääntyilyn ja helmojen leviämisen havaitsemiseen esimerkiksi pudotustestaustulkkien avulla. Tarve kansien mittaamiselle on syntynyt asiakkaalta saaduista reklamaatioista koskien margariinirasiakansien epäsojivuutta toisen valmistajan valmistamien rasioiden kanssa. Erityisesti yhteensojivuuden kanssa ongelmia esiintyy tilanteessa, jossa kannet ja rasiat valmistetaan keskenään eri materiaaleista. Tällöin on todennäköistä että kappaleiden erilainen kutistumiskäyttäytyminen vaikuttaa yhteensojivuuteen. Kannet valmistetaan osakiteisestä polypropeenista (PP), joka kutistuu suhteellisen paljon (muottikutistuma noin 1,8 %), kun taas eri valmistajan tuottamat rasiat valmistetaan amorfisella polystyreenillä (PS) pinnoitetusta kartongista, jonka kutistuma on vähäistä (polystyreenin muottikutistuma noin 0,5 %). Työn teoriaosuudessa on kerrottu tarkemmin polymeerimateriaalien kutistumiskäyttäytymisestä ja siihen vaikuttavista asioista, kuten muovaus- ja jäähdytysolosuhteista lämpömuovausprosessissa.

Kansien laadunvalvontaa pyritään kehittämään hankkimalla konenäkösystemi, jolla kansia voitaisiin mitata tarkasti, nopeasti ja luotettavasti, ja näin tarkistaa ja osoittaa että valmistusprosessin ja kansien jäähtymisen jälkeen mitat ovat halutunlaiset. Mittaustulokset tallennetaan, jotta niitä voidaan tarkastella myös mittausten jälkeen ja muualtakin kuin suoraan mittauspisteeltä. Kansissa lämpömuovausprosessin seurauksena tapahtuva jälkikutistuma tulee huomioida mittaustuloksia arvioitaessa. Olisikin toivottavaa, että kansissa tietyn ajan sisällä valmistuksesta tapahtuvan kutistuman osuus voitaisiin arvi-

oida mittausten yhteydessä. Merkittävintä jälkikutistuma kansille tehtyjen mittausten perusteella on ensimmäisten 2 - 3 päivän aikana niiden valmistuksen jälkeen. Tarvittaessa myös muita kansissa tapahtuvia muutoksia, kuten vääntymistä tai helmojen leviämistä voitaisiin arvioida konenäön keinoin. Kansien laadunvalvonnan lisäksi konenäkösystemiä voitaisiin käyttää mahdollisesti myös muunlaisten tuotteiden mittauksissa ja myös apuna tuotteille tehtävissä laboratoriotutkimuksissa, joissa tarvitaan tuotteiden tarkkoja mittoja, kuten esimerkiksi kutistumismittauksissa. Tässä työssä on keskitytty vain kansien laadunvalvonnan kehittämiseen, mutta esimerkiksi konenäköyriyksille lähtötietoja annettaessa on mainittu myös mahdollinen käyttö muissakin soveluksissa. Joka tapauksessa pääasiallinen tehtävä konenäkösystemille olisi dimensioiden mittaaminen.

Laadunvalvonnan tarpeisiin sopiva konenäkösystemi voisi toimia esimerkiksi seuraavasti: laadunvalvonnasta vastaava työntekijä siirtää sovitun määrän kansia mittauspisteelle niiden jäähtyttyä huoneenlämpöisiksi. Kannet siirretään yksi kerrallaan mitattavaksi joko robotiikan avulla tai manuaalisesti. Myös erilaiset liukuhihnasytemit ovat mahdollisia, mutta niiden vaatima tila saattaa rajoittaa niiden sijoittamista tuotantoympäristöön. Kansi kuvataan käyttäen valaistusta, joka maksimoi kontrastin kansisovitteen kannalta merkittävien reunojen alueella, kuvasta mitataan halutut mitat ja mahdollisesti myös tarkistetaan kappaleen muoto, saadut mitat tilastoidaan ja tallennetaan. Mittaustuloksista voidaan mahdollisesti korostaa poikkeavat mittaustulokset sekä arvioida mitat tietyn ajan kuluttua mittauksesta.

Tarkastusotanta

Koska kansia valmistetaan päivittäin hyvin suuria määriä, ei ole järkevää, eikä edes mahdollista mitata jokaista kantta erikseen. Koska kansien välillä on pesäkohtaisia eroja, on tarkastettavien kansien otanta järkevää valita siten, että siihen sisältyy sama määrä kansia joka pesästä. Tällöin valvonnassa pystytään seuraamaan pesäkohtaisia eroja ja selkeitä poikkeamia kokonaisotannasta. Kansituotannossa käytettävät muotit ovat 10-pesäisiä, joten esimerkiksi 10 iskun aikana tuotettu kansimäärä olisi 100 kappaletta, joka voisi olla hyvä tarkastusotanta, esimerkiksi kolme kertaa päivässä, tai aina kun muovikalvorulla vaihdetaan uuteen tai prosessiparametrejä säädetään. Konenäköyriyksille annetuissa lähtötiedoissa on mainittu sadan kannen tarkastusotanta ajankäytön suunnittelemiseksi. Myös esimerkiksi viiden iskun mittaaminen sovituin aikavälein tai tätäkin pienemmän otannan mittaaminen säännöllisesti, esimerkiksi kahden tunnin välein voisi olla toimiva ratkaisu, sillä poikkeamat kansien koossa ilmenevät SmartScopella tehtyjen kutistumismittausten perusteella huomattavasti merkittävämmiin pesäkohtaisesti kuin iskukohtaisesti, jolloin saman muottipesän peräkkäisten iskujen kansilla ei ole merkittäviä kokoeroja. Koska kansien mittaaminen on aiemmin ja kutistumistutkimuksen yhteydessä SmartScope-videomittalaitteella ollut vaikeaa, ja tulokset erinäisistä syistä johtuen suhteellisen epäluotettavia, ei tässä vaiheessa voida suunnitella tarkastusotantaa aiempien mittaustilastojen pohjalta tarkemmin. Onkin järkevintä, että kun konenäkösystemi

on suunniteltu, hankittu ja otettu käyttöön, suoritetaan sillä mittauksia, joista saatujen mittaustietojen perusteella arvioidaan sopiva tarkastusotanta tarvittaessa uudelleen.

Joustavuus ja ulottuvuus

Kansien laadunvalvontaan suunniteltavan konenäkösystemin tulisi olla joustavuudeltaan sellainen, että sitä voitaisiin ohjelmoida piirteiltään erityyppisten ja eriväristen kansien mittaamiseen. Myös muunlaisten kappaleiden mittaamisen mahdollisuus olisi eduksi. Ulottuvuudeksi systeemille riittää 2D, tietyin edellytyksin myös jopa 1D. 2,5D- ja 3D-systeemejä ei kuitenkaan tule poissulkea, sillä sen avulla saataisiin kansista myös sellaista lisätietoa, mitä ei 2D-systeemeillä yhtä luotettavasti saada, esimerkiksi kansien vääntyilystä ja helmojen pullottamisesta. Tietynlaisilla sovelluksilla kannesta saatua 3D-kuvaa voidaan esimerkiksi verrata kannen CAD-kuvaan, jolloin nähdään mahdolliset poikkeamat kannen muodossa. Myös muunlaisten kappaleiden mittaamisessa 3D-systeemi voi osoittautua tarpeelliseksi. 3D-systeemit ovat kuitenkin tavallisesti hieman kalliimpia kuin 2D-systeemit, joten kustannusten suhteen päätöksiä tehdessä kannattaa kiinnittää mieltä tarkoin, ollaanko valmiita maksamaan enemmän systeemistä, jolla saadaan enemmän tietoa, kuin mikä olisi varsinaisen laadunvalvonnan kannalta välttämätöntä. Yleensä konenäkösystemiä suunniteltaessa kannattaa valita juuri ne minimiominaisuudet, joita vaaditaan, eikä ottaa liian laajaa ominaisuusvalikoimaa, jotta systeemistä ei tulisi liian monimutkainen käyttää tai kustannuksista liian korkeita. Tässä tapauksessa kannattaa kuitenkin huomioida myös mahdolliset tulevaisuuden tarpeet, sillä kansien lisäksi valmistetaan myös monia muita kappaleita, joista voidaan tarvita tarkkaa mittaustietoa.

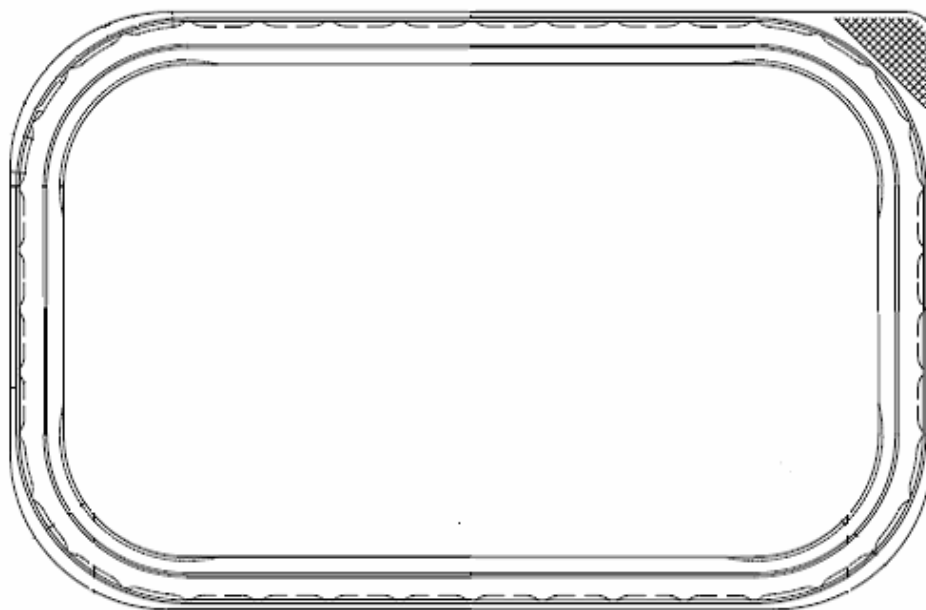
4.2. Perustiedot kannesta

Tutkittavia margariinirasian kansista valmistetaan erilaisia malleja, mutta pääpiirteiltään ne muistuttavat toisiaan. Suurin mittaamisen tarve koskee erityisesti tiettyä kansimallia, jonka vastakappale, eli rasia, valmistetaan eri valmistajan toimesta ja eri materiaalista, jolloin kutistumasta aiheutuu todennäköisimmin ongelmia. Tästä eteenpäin tekstissä tätä kansimallia kutsutaan selvyys vuoksi keltaiseksi malliksi. Yleisimmän, peruskansimallin kanssa mittaamisen tarve on vähäisempi. Kuten jo kansien kutistumistutkimuksen yhteydessä aiemmin mainittiin, kutistumismittaukset suoritettiin peruskansimallille, käytetyn mittalaitteen (SmartScope) rajoitteiden vuoksi, joten myös tässä vaiheessa käsitellään rinnakkain sekä perusmallia että keltaista mallia.

Koko ja ulkonäkö

Valmistettavat margariinirasian kannet ovat suorakaiteen muotoisia ja niiden päämitat ovat 145,5 x 95,5 mm molemmissa tutkittavista malleista. Lisäksi ainakin perusmallia valmistetaan myös isompana, 600 gramman margariinirasiaan sopivana. Kuvassa 32 on peruskannen mallikuva, jossa näkyy kannen sisäreunassa olevat ulokkeet, joita on tasai-

sin välein koko kannen ympäri. Ulokkeiden tarkoituksena on ”lukittaa” kansi pysymään paikoillaan rasian päällä.



Kuva 32: Peruskansimalli, jossa sisäreunassa ulokkeita koko kannen ympäri.

Kuvassa 33 on keltaisen kansimallin kuva asennossa, josta on nähtävissä, että edellä mainittuja ulokkeita on vain kannen kulma-alueilla. Kulma-alueet ovatkin kannen jäykimmät alueet, joissa näiden ulokkeiden merkitys on suurin. Muilla alueilla kannen reuna joustaa niin paljon, ettei ulokkeiden lukittava vaikutus ole kovinkaan merkittävä.



Kuva 33: Keltainen kansimalli, jossa ulokkeita on vain kannen kulma-alueilla.

Kuvassa 34 nähdään näiden kahden kansimallin sivuprofiileissa olevat erot. Perusmallin korkeus on 12,4 mm ja keltaisen mallin korkeus 12 mm.



Kuva 34: a) Peruskansimallin ja b) keltaisen kansimallin sivuprofiilit.

Kansimallien välillä on siis tiettyjä muotoeroja, jotka tulee huomioida konenäkösystemiä suunniteltaessa. Myös kansimallien väriytyy poikkeaa toisistaan, sillä perusmallia valmistetaan lähinnä valkoisena ja kirkkaana (hieman samea), ja keltaista kansimallia vaalean keltaisena. Painatus kansiin tehdään joko esipainatuksena, jolloin lämpömuovattavassa muovikalvossa on painatukset valmiina, tai jälkipainatuksena muovausprosessin jälkeen. Kummassakaan tapauksessa painatuksen väri ei kuitenkaan vaikuta kannen sisäosille tehtäviin mittauksiin, sillä painatus tulee vain ulkopinnalle.

Kannet ovat pinnaltaan melko sileitä, pientä pinnan epätasaisuutta on havaittavissa suurilla suurennoksilla ja pinta onkin lähempänä mattaa kuin kiiltävää. Epätasaisuutta on erityisesti kannen sisäosissa. Kansien muovauksessa on käytetty positiivimuottia, joten niiden sisäosat ovat tarkkoja kopioita muotista ja sen pintakuviosta. Valmistustekniikasta johtuen kansien kulmat ovat myös hieman pyöreitä ja silmämääräisesti syvyys-suunnassa pystysuorat sivut eivät todellisuudessa ole muottipäästöjen vuoksi täysin pystysuoria. Tämä voi vaikuttaa reunojen mittaamiseen tarkkuuteen konenäkösystemillä.

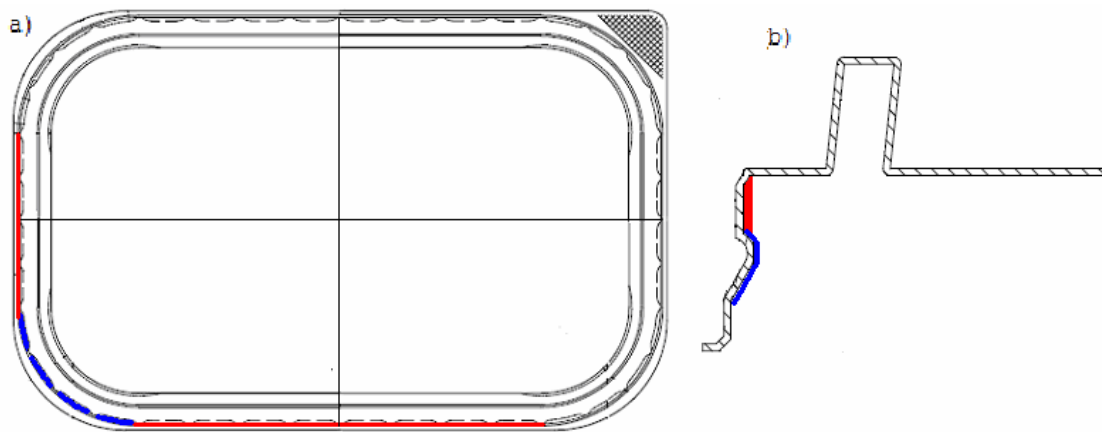
Raaka-aine

Kansia valmistetaan polypropeenin homo- ja kopolymeerimuodoista. Raaka-aineeseen on lisätty esimerkiksi väriaineita, antistatteen ja muita lisäaineita. Valmistuksessa käytetään sekä neitsyt- että kierrätysmateriaalia, joiden väliset suhteet voivat vaihdella eri valmistuserien välillä. Kannet valmistetaan ekstruusiolla samassa tehtaassa valmistetusta muovikalvosta off-line-prosessilla, jolloin kalvorullat eivät tule lämpömuovauspisteelle suoraan ekstruusiosta, vaan niiden varastointiajat vaihtelevat. Raaka-aine-erissä on siis eroja, joilla voi olla vaikutusta kansien ominaisuuksiin esimerkiksi muovautumisominaisuuksien tai kutistumiskäyttäytymisen suhteen, mutta kansien ulkoiset ominaisuudet pysyvät kuitenkin samanlaisina valmistuserästä riippumatta.

Kiinnostavat piirteet

Koska ongelmana on kansien sopimattomuus rasioihin, täytyy niistä mitata sellaiset mitat, jotka vaikuttavat kannen ja rasian yhteensopivuuteen. Tällaisia mittoja ovat kansisovituksen mitat. Kansista tulee mitata pituus ja leveys niistä reunoista, jotka ovat kosketuksissa rasian reunan kanssa kannen ollessa paikallaan (kuva 35). Myös kansien sisäreunassa olevien pienten ulokkeiden (kuva 35, korostettu sinisellä) ulottuvuus voidaan

mitata, erityisesti kannen kulma-alueilta, joilla ulokkeiden kantta lukittava vaikutus on merkittävin. Nämä ulokkeet siis ”lukitsevat” kannen rasian päälle, joten niillä on ilmeinen vaikutus erityisesti kannen paikallaan pysyvyyden kannalta. Ulokkeet ovat kuitenkin jo valmiiksi niin pieniä, ettei kutistuman vaikutus niissä ole yhtä merkittävä kannen sopivuuden kannalta, kuin itse kannen mitoissa.



Kuva 35: Peruskansimallin a) profiilikuvassa ja b) leikkauskuvassa punaisella korostetuna reuna, joka on rasian kanssa kontaktissa ja sinisellä kannen sisäreunan ulokkeet, joiden merkitys kulma-alueilla on suurin. Keltaisessa kansimallissa ulokkeita on vain kulma-alueilla. Kansien laadunvalvonnassa mitattavaksi voitaisiin valita siis punaisella korostetun reunan ja sen kanssa vastakkaisen reunan etäisyys toisistaan. Myös kulma-alueiden ulokkeiden mittaaminen voi olla tarpeen.

Kuvassa 35 korostetut mitattavat piirteet ovat olleet mukana myös konenäköryityksille annetuissa mittaustehtävän lähtötiedoissa, joten myöhemmin esiteltävissä konenäköryitysten esimerkkiratkaisut on suunniteltu mm. näiden tietojen perusteella.

4.3. Mittaustapahtuma - nopeus ja liike

Mitattavat kannet ovat siis erillisiä kappaleita. Tuotantolinjalla valmiit kannet pinotaan heti valmistuksen jälkeen, joten kansien mittaaminen suoraan tuotantolinjalta ei onnistu ilman tuotantolinjaan tehtäviä muutoksia. Mitattava kansierä tulee siis siirtää tuotantolinjalta erillään sijaitsevalle mittauspisteelle mittaamisen ajaksi. Tällöin konenäkösystemin suunnittelussa ei ole valmiiksi määritelty sitä, ovatko kannet kuvaamisen aikana liikkeessä vai paikallaan, montako kantta on samassa kuvassa, jne, vaan kaikki vaihtoehdot ovat mahdollisia tarvittaessa huomioida. Jos esimerkiksi konenäköasiantuntijalla on ajatus systeemistä, jossa kansia on useita samassa kuvassa tai jossa kannet liikkuvat kuvaamisen aikana, voidaan tämä tehdä mahdolliseksi kuvauspisteen suunnittelun yhteydessä. Myös kuvausgeometria on vielä varsin vapaasti valittavissa. Tässä vaiheessa ollaan siis avoimia kaikille vaihtoehdoille.

Paikallaan olevia kansia kuvattaessa voidaan päättää siirretäänkö kannet mittauspisteelle manuaalisesti, vai esimerkiksi robotiikan avulla. Kansien liike mittausten aikana taas on mahdollista toteuttaa esimerkiksi liukuhihnan tai pyörivän mittausalustan avulla. Tällöin liike voidaan vaihtoehtoisesti joko pysäyttää aina kuvanoton ajaksi tai kappale voidaan kuvata sen ollessa liikkeessä. Kuvaustapahtuma voidaan ajoittaa esimerkiksi kappaleen tietyn sijainnin mukaan.

Koska kansien mittaaminen tullaan toteuttamaan erillisenä tuotantolinjalta, ei myöskään systeemin nopeudelle ole tiukkoja vaatimuksia esimerkiksi lämpömuovausprosessin sykliajan perusteella. Jos systeemiin päädytään liittämään automatiikkaa, tulee nopeusvaatimukset määrittää myöhemmin uudestaan. Joissain systeemeissä, erityisesti sellaisissa, joissa kappale on liikkeessä, voi olla tarpeen kiinnittää kannet kuvaamisen ajaksi. Kiinnityssysteemi ei saa kuitenkaan vaikuttaa kansien mittoihin, esimerkiksi painamalla kansia litistykseen. Kiinnittämiseen ei myöskään tule kulua merkittävästi aikaa. Kansien materiaali, polypropeeni, ei ole erityisen arka valolle, joten sen vaurioituminen mittauksen aikana esimerkiksi valon vaikutuksesta on epätodennäköistä.

4.4. Kameratekniikka ja optiikka

Konenäkötekniikan asiantuntija tekee päätökset käytettävästä kamera- ja optiikkateknikasta kun systeemiä suunnitellaan yksityiskohtaisemmin. Kuitenkin jo tässä vaiheessa voidaan käydä läpi joitain vaatimuksia. Mittaussovellukseen riittää käytettäväksi harmaasävyysteemi, koska reunojen tunnistamiseksi ei värinäköä vaadita. Tietoa tarvitaan todennäköisesti kuitenkin enemmän kuin pelkällä binäärisysteemillä voidaan saada. Nykyään lähes kaikki kamerat ovat digitaalisia, joten varmasti myös tässä tapauksessa päädytään digitaaliseen käyttöliittymään. Vaikka kansien mittaaminen on muuten melko yksinkertainen tapahtuma, tarvitaan systeemissä tallennustilaa mittausdatalle. Tällöin yksinkertaisimpien älykamerasysteemien muistikapasiteetti ei välttämättä riitä, vaikka ne ominaisuuksiensa puolesta muuten soveltuisivatkin tähän tarkoitukseen. Suurnopeus-toimintoa ei tarvita, koska tavoitteena ei ole tarkkailla nopeaa tapahtumaa hidastetussa muodossa. Jos esimerkiksi tarkkailtaisiin kansien muovausprosessia, voitaisiin suurnopeuskameralla kuvata lämpömuovausprosessin iskut ja saada tietoa esimerkiksi materiaalin jakautumisesta prosessissa.

Optiikan suunnittelun kannalta tiedossa on ainakin kannen mitat. Kuva-alueeseen (FOV) tarvittavia tietoja ovat maksimi kappalekoko, maksimi vaihtelu kappaleen asennossa ja suunnassa, kappalekoon vaihtelumarginaali sekä kamerasensorin sivusuhte. Optiikalta vaadittavan resoluution määrittää kohteen pienin piirre, joka tulee olla tarkasti erotettavissa. Tällaiseksi piirteeksi voidaan ajatella joko kannen sovitteen reunaviiva tai sovitteessa olevat ulokkeet. Riittävä mittaustarkkuus kansien laadunvalvonnan tarpeisiin voisi olla 0,1 mm. Mahdollisissa laboratoriomittauksissa voidaan kuitenkin tarvi-

ta suurempia tarkkuuksia (esimerkiksi 0,01 mm), mikä tulee tarvittaessa huomioida esimerkiksi optiikkaa, valaistusta ja kuvausgeometriaa valittaessa.

4.5. Valaistus ja kuvausgeometria

Kansituotannon laadunvalvontaan suunniteltavaan konenäkösystemiin tarvittava valaistus on sellainen, joka maksimoi kontrastin siten, että mittausten kannalta tärkeät piirteet (kannen sisäreunat ja mahdollisesti myös kulma-alueiden ulokkeet, kuva 35) ovat selkeät. Koska mittaamisen kannalta tärkeät reunaviivat eivät ole kansien ääri viivoja, vaan sijaitsevat kannen sisäosissa, täytyy kannen muotojen aiheuttamat varjot minimoida esimerkiksi huolellisen kuvausgeometrian suunnittelulla ja asetusten pitämisenä vakiona. Tässä vaiheessa tulee huomioida myös kansien värierot ja kirkkaiden kansien valon läpäisevyys. Koska kansista haluttu tieto liittyy ainoastaan reunaviivojen perusteella tehtäviin mittauksiin, ei valaistuksen tarvitse korostaa pintaominaisuuksia.

Esimerkiksi diffusoitu etuvalaistus voisi tulla kyseeseen kansimittauksissa, koska tällöin kamera on suoraan kohteen yläpuolella ja hajavalolla saadaan tasainen valaistuskenttä koko kohteeseen. Etuvalolla saadaan korostettua kannen sisäosien muodot, joissa tärkeät reunaviivat sijaitsevat. Koska kannet ovat pinnaltaan lähempänä mattaa kuin kiiltävää, voidaan valolähteistä sulkea pois ainakin polarisoitu valo, jota käytetään lähinnä kiiltävien pintojen kuvantamisessa. Myöskään valaistuksen välähtelyominaisuutta ei tarvita. Esimerkiksi LED-valo voisi olla sopiva tähän sovellukseen, koska sen voidaan sanoa sopivan lähes mihin vain. Jos päädytään 3D-sovellukseen, tulee kyseeseen myös laser tai muu vastaava hyvin kapean aallonpituusalueen valolähde.

Koska kansien mittaaminen perustuu reunaviivojen etsimiseen, tulee kuvausgeometrian olla sellainen, että oikeat reunat on helppo tunnistaa kuvasta. Piirteiden terävyyden vaihtelu erilaisilla valaistusvaihtoehdoilla kuvattaessa tulee huomioida. Kuvaan muodostuvat varjot häiritsevät reunojen terävyyttä kuvassa, joten varjostukset tulisi minimoida valaistuksen ja kameran sijainnin avulla. Kaikki kannet on siis kuvattava samoilla kamera- ja valaistusasetuksilla, jotta tulokset olisivat luotettavia ja vertailukelpoisia. Erilaisella kuvausgeometrialla voidaan saada samasta kannesta merkittävästikin erilaisia mittaustuloksia, erityisesti kun kappaleessa on pyöreitä kulmia ja syvyyssuuntaiset reunat eivät ole täysin pystysuoria.

4.6. Mekaaninen suunnittelu

Koska kansituotannon tiloissa valmistettavat tuotteet ovat elintarvikepakkauksia, on tuotantoympäristö pidettävä siistinä pölystä ja liasta. Erityisempiä lämpötilan tai kosteudenvaihteluita tai värinää ei myöskään esiinny. Konenäkösystemiä ei siis ole tarpeen suojata mekaanisilta iskuilta, värinältä, lialta, kosteudelta tai lämmöltä, koska tuotantoympäristössä näitä häiriötekijöitä on joko vähän tai ei ollenkaan. Tuotantotilojen valais-

tus on melko kirkas, mutta kuitenkin tasainen. Kirkas valaistus saattaa kuitenkin häiritä konenäkösystemin toimintaa, jolloin systeemi tulee suojata ympäröivältä valaistukselta. Tähän voisi ratkaisuvaihtoehtona olla esimerkiksi kuvanottoalueen koteloiminen siten, ettei ympäristön valaistus häiritse kohteen kuvantamista. Myös siinä tapauksessa, jos päädytään käyttämään laservaloa, täytyy systeemin ympäristössä liikkuvat ihmiset suojata laserilta. Melutaso tuotantotiloissa on melko korkea, joten konenäkösystemiä tuotantoympäristöön suunniteltaessa voitaisiin miettiä valosignaalia käytettäväksi äänisignaalin sijaan merkkinä esimerkiksi mittausten etenemisestä tai niiden aikana ilmenneistä ongelmista.

Systeemissä käytettävien osien huolto ja vaihdettavuus tulee tehdä mahdolliseksi ilman, että systeemin luotettavuus kärsii. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi lampunvaihdon yhteydessä systeemi on kalibroitava uudelleen. Huomioitavaa lampunvaihdon kannalta on myös se, että käytettäessä tietynlaisia valolähteitä, niitä tulisi uusia tasaisin väliajoin jo huomattavasti ennen, kuin ne menettävät tehonsa kokonaan, koska vanhetessaan esimerkiksi niiden kirkkaus kärsii, jolloin myös kuvan kontrasti kärsii.

Konenäkösystemin sijoittamisen suhteen ei ole tiedossa suurempia rajoituksia, koska se ei toimi varsinaisesti yhteydessä mihinkään tuotantolinjaan, vaan toimii erillisenä yksikkönä. Kuitenkin järkevintä olisi sijoittaa laitteisto kohtuullisen lähelle kansituotantoa, jotta kansien kuljettaminen mittauksia varten ei kuluttaisi kohtuuttomasti työntekijöiden aikaa. Konenäkösystemin vaatima tila riippuu valitusta sovelluksesta. Kuitenkin tilaa tarvitaan ainakin huolto- ja ylläpitotöille, kuten osien vaihtamiselle tai puhtaanapidolle. Systeemistä riippuen voi olla tarpeen esimerkiksi robotiikan tai liukuhihnapöydän sisällyttäminen systeemiin, joten tarvittaessa myös tähän tarkoitukseen on varattava riittävästi tilaa toimintaympäristöstä.

4.7. Ohjelmisto

Kansien mittaamiseen käytettävään konenäkösystemin ohjelmistoon tarvittavia ominaisuuksia voivat esimerkiksi olla reunojen ja piirteiden tunnistus ja etäisyyksien mittaaminen, kannen suunnan määrittäminen siinä määrin, ettei kansia tarvitse asetella ennen mittausta erityisen tarkasti (kuten SmartScopella), tulosten tallentaminen ja vertaaminen tavoitemittoihin toleransseineen, eri kansi- ja kappaletyyppien ohjelmoitavuus ja muistaminen sekä muodon määrittäminen tarvittaessa vääntymien havaitsemiseksi. Lisäksi valittavan ohjelmiston olisi toivottavaa sisältää jonkin verran myös laskentakapasiteettia kansien koon arvioimiseksi tietyn ajanjakson kuluessa kutistumisen jälkeen. Ohjelmiston ei tarvitse varsinaisesti määrittää hyväksytyjä ja hylättyjä kappaleita, vaan tallentaa mittaustiedot tarkastelua varten. Varsinaisia kuvia kansista ei tarvita muuhun kuin dimensioiden mittaamiseen, joten kuvadataa ei tarvitse tallentaa muistiin. Tämän suhteen voidaankin miettiä riittääkö esimerkiksi älykameran kapasiteetti täyttämään tarpeet.

Ohjelmistolta vaaditaan myös helppokäyttöisyyttä ja käyttäjäystävällisyyttä, sillä todennäköisesti mittauksia ei tule suorittamaan aina yksi ja sama tehtävään koulutettu henkilö, vaan mittaukset suorittaa kulloinkin työvuorossa oleva laadunvalvonnasta vastaava työntekijä. Vaikka konenäkösystemiä nyt pääasiassa haetaan juuri tiettyjen kansien mittaamiseen, on erittäin todennäköistä, että sitä halutaan jatkossa hyödyntää myös muunlaisiin kappaleisiin. Tästä syystä mahdollisuus ohjelmoida lisää erilaisia kappalemalleja mitattavaksi olisi eduksi ja valittavan ohjelmiston tulisikin olla melko vapaasti muunneltavissa ja laajennettavissa muuttuvien tarpeiden mukaan. Tällöin konenäkösystemin käyttöä ei rajoiteta automaattisesti ainoastaan tiettyjen kansien mittaamiseen, vaan sitä voidaan tulevaisuudessa hyödyntää myös muiden tuotteiden laadunvalvonnassa tai tutkimuksessa. Kuitenkin systeemillä mitataan aina yhtä kappaletyyppiä kerrallaan, joten systemin ei tarvitse itsenäisesti tunnistaa mitattaansa kappaletyyppejä.

4.8. Kustannukset ja projektin toteuttaminen

Kokonaiskustannukset voidaan arvioida vasta, kun sopivan konenäkösystemin suunnittelutyö valmis ja kustannusten suunnittelu ja arviointi tehdäänkin yhdessä konenäkösystemin suunnittelijan kanssa, kun projekti saadaan kunnolla käyntiin. Kustannusten suunnittelussa tulee huomioida myös systemin tuomat edut ja pitkän aikavälin vaikutukset laadunvalvonnan kannalta. Myös varsinainen projektin toteuttaminen tapahtuu yhteistyössä konenäköasiantuntijan kanssa. Toteuttamisvaiheessa tulee todennäköisesti vastaan myös sellaisia asioita, joita suunnitteluvaiheessa ei ole huomioitu, joten viimeistään tässä vaiheessa tarvitaan yhteistyötä konenäön, tuotannon ja laadunvalvonnan asiantuntijoiden kesken. Toteuttamisvaiheessa suoritetaan asianmukaiset testaukset ja koeajot sekä riittävä dokumentointi projektin etenemisestä.

4.9. Erilaisten ratkaisuvaihtoehtojen esittely

Seuraavaksi esitellään erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja kansien mittaamiseen. Ehdotukset on saatu Tekniikka2010-messujen konenäköpäivään osallistuneiden konenäköyritysten edustajilta. Ehdotukset ovat siis eri henkilöiden tekemiä, joten niiden lähestymistavat ja näkökulmat mittaustehtävän suhteen vaihtelevat. Messuilla eri yritysten edustajille jaettiin tutkittavia kansia (lähinnä peruskansimallia) ja annettiin perustiedot tehtävästä. Näiden perustietojen perusteella asiasta kiinnostuneet yritysten edustajat tekivät eritasoisia esiselvityksiä kansien mittaamiseen soveltuvista konenäkösystemeistä. Osa ehdotuksista perustuu keskenään samankaltaisiin periaatteisiin, mutta asiaa on voitu lähestyä eri näkökulmasta. Eri ehdotukset on esitetty satunnaisessa järjestyksessä.

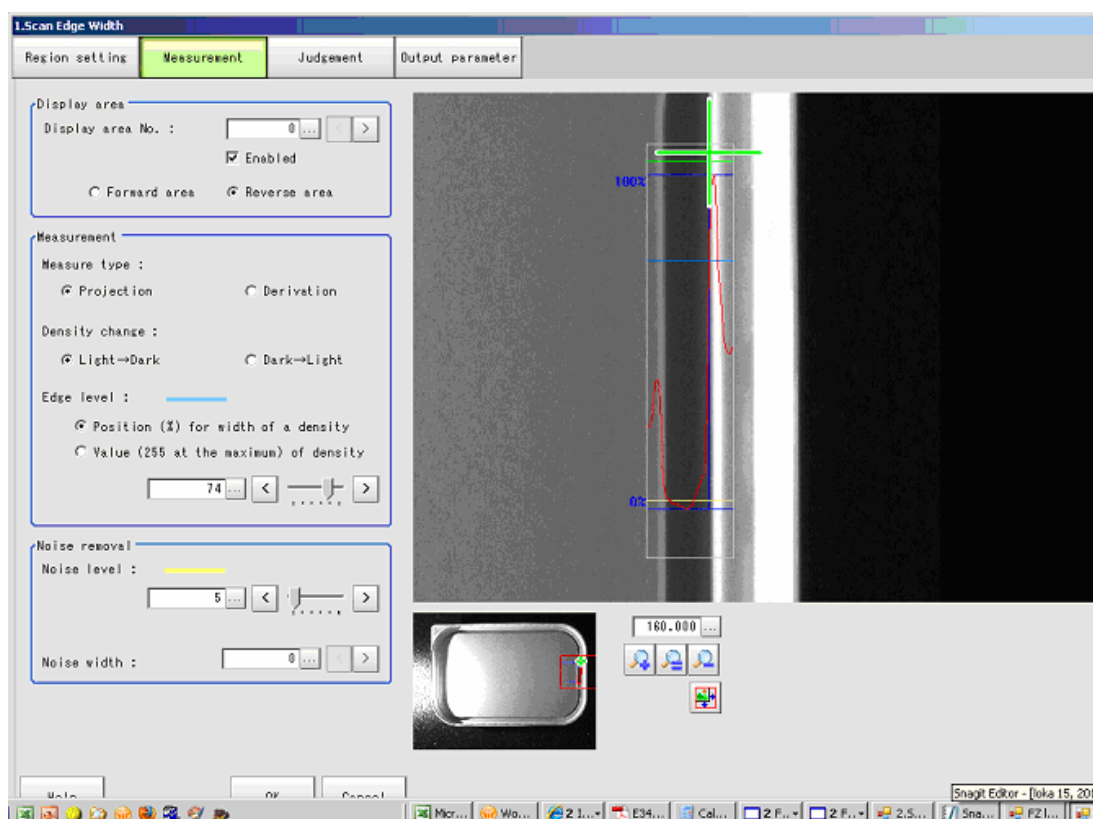
Esimerkki 1:

Ensimmäisessä ratkaisuesimerkissä käytetään laitteistona Xpectia FZ3:a ja 2 Mpx harmaasävykameraa. Valittu laitteisto soveltuu erityisesti sellaiseen käyttöön, jossa sovel-

lusta ylläpidetään ”omin voimin”, eli mittausalueen ja muiden ominaisuuksien tulee olla muokattavissa, esimerkiksi uusien kappaletyyppien myötä, ilman erityisosaamista. Ratkaisuesimerkin antaneen yrityksen kautta on saatavilla myös erilaisia valaistusratkaisuja.

Tällä systeemillä 0,1 mm mittaustarkkuuteen päästään valitulla 2 Mpx kameralla. Suuremman tarkkuuden saavuttamiseksi samalla kuva-alalla vaaditaan suurempi kameran kennokoko (0,01 mm tarkkuuteen jopa 200 Mpx, jollaista ei perustekniikan puitteissa ole saatavilla). Tämä johtuu siitä, että yhteen dimension suuntaan resoluution kasvattaminen kaksinkertaiseksi, tarkoittaa kameran kennokoon kasvattamista nelinkertaiseksi. Jos siis halutaan saavuttaa 0,01 mm tarkkuus, tulee kuva-alaa pienentää esimerkiksi käyttämällä useampaa kameraa ja parantaa toistettavuutta osapikseleiden hyödyntämiseksi esimerkiksi mekaniikan, valaistuksen tai tuennan avulla. Myös strukturoitua valoa käyttämällä voidaan saada tarkkuutta parannettua ja myös toistettavuus paranee. Edellä mainituista vaihtoehdoista useamman kameran käyttö parantaa tarkkuutta tehokkaimmin. 0,01 mm tarkkuuden saavuttavan systeemin kustannukset olisivat kuitenkin selvästi suuremmat kuin yksinkertaisemman systeemin. Todennäköisesti kuitenkin hyvä toistettavuus riittäisi takaamaan, että tuotannossa olevat kannet ovat dimensioiltaan riittävän lähellä toisiaan, vaikka tarkastus tehtäisiinkin ”normaaleilla” resoluutioilla.

Kuvassa 36 nähdään kyseisellä laitteistolla kannesta otettu kuva reunanetsintätyökalulla hahmotettu reuna. Esiselvityksessä ei kokeiltu erikseen erilaisia valon suuntauksia, mutta systeemillä voidaan yhtä hyvin mitata muitakin kannen reunoja ja piirteitä valaistusta ja kuvausgeometriaa muokkaamalla. Laitteisto on siis muunneltavissa tarpeiden mukaisesti. Kuvan 36 alareunassa näkyy 2 Mpx kameran kuva-ala kokonaisuudessaan.



Kuva 36: Esimerkkikuva kansien mittaamiseen ehdotetun laitteiston mittausrätkymästä. Kuvan alareunassa käytetyn kameran kuva-ala kokonaisuudessaan.

'Scan Edge Width' -työkalua käyttämällä saadaan kuvasta mitattua haluttuja piirteitä. Syvyystietoon päästään tarvittaessa käsiksi joko valoviivaa tai sivukameraa käyttämällä.

Kokeilussa käytetty laitteisto:

FZ3-H905 keskusyksikkö

FZ-S2 ikamera (XGA 1600*1200)

FZ-LEH16 16mm optiikka

FZ-VSM kamerakaapelit

FZ-VP I/O -kaapeli triggeriä varten

S8V 24024 teholaähde

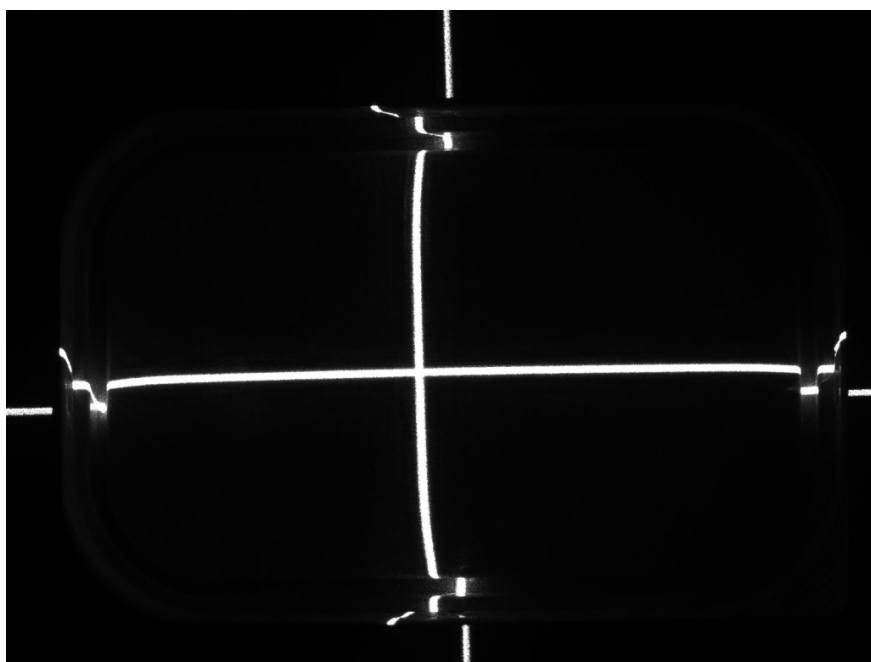
(Lähde: Matti Heinilä/Omron)

Esimerkki 2:

Cheos Oy:n Kim Grundströmin mukaan kansia mittaava konenäkösystemi on kohtuullisen helppo toteuttaa. Esimerkiksi mittaustarkkuus, nopeus, yms. ovat riippuvaisia valituista kennoista, optiikasta sekä muista komponenteista, ja kaikki tekijät ovat skaalattavissa ylös- tai alaspäin, joten niihin ei vielä tässä vaiheessa ole otettu kantaa. Mikäli kysymyksessä on off-line mittaus, ei tahtiajalla ole välttämättä merkitystä. On-line mittaus on asia erikseen. Kuvausjärjestelmä on rakennettavissa suljettuun koteloon, johon työn-

netään kansia mitattavaksi yksi kerrallaan. Jos kansia halutaan tuoda mittalaitteelle nipuissa, on systeemin automaatiota suunniteltava erikseen.

Esitutkimusta varten oli käytettävissä valkoinen ja läpinäkyvä peruskansi ja oletuksena on off-line mittaus. Koska mitattavien kansien väri voi vaihdella, asetettiin lähtökohdaksi seuraavanlainen ratkaisu: mitattava tuote (kansi) pidetään suljetussa tilassa ja näin eliminoidaan ympäristön tuottama valo ja sen aiheuttamat ongelmat. Valolähteenä käytetään strukturoitua laservaloa, esitutkimuksessa on käytetty 2 kpl viivalasereita XY-suunnissa. Kameraksi valitaan älykamerapohjainen ratkaisu, jolloin pystytään rakentamaan täysin erillinen mittausasema ilman erillistä tietokonetta. Ohjelmointi on parametroida, eli käyttäjällä on mahdollisuus päivittää, modifioida ja luoda uusia malleja ja mitausrutiineja ilman syvempää ohjelmointiosaamista. Optiikka, kaapelointi, I/O:t, kommunikointi, jne. ulkomaailmaan on helposti järjestettävissä ja integroitavissa esimerkiksi tuotannonohjausjärjestelmään. Ratkaisu on helppo ja edullinen ja helposti monistettavissa muille vastaavanlaisille tuotteille, ja voidaan soveltaa tarvittaessa myös online-mittauksiin/tarkastuksiin. Kuva 37 on esimerkkikuva tällaisella systeemillä saatavasta kuvadatasta, jonka perusteella mittaukset suoritetaan. Kuvassa tutkittava kansi on siis kuvattuna kahta viivalasaria x- ja y-suunnassa apuna käyttäen.

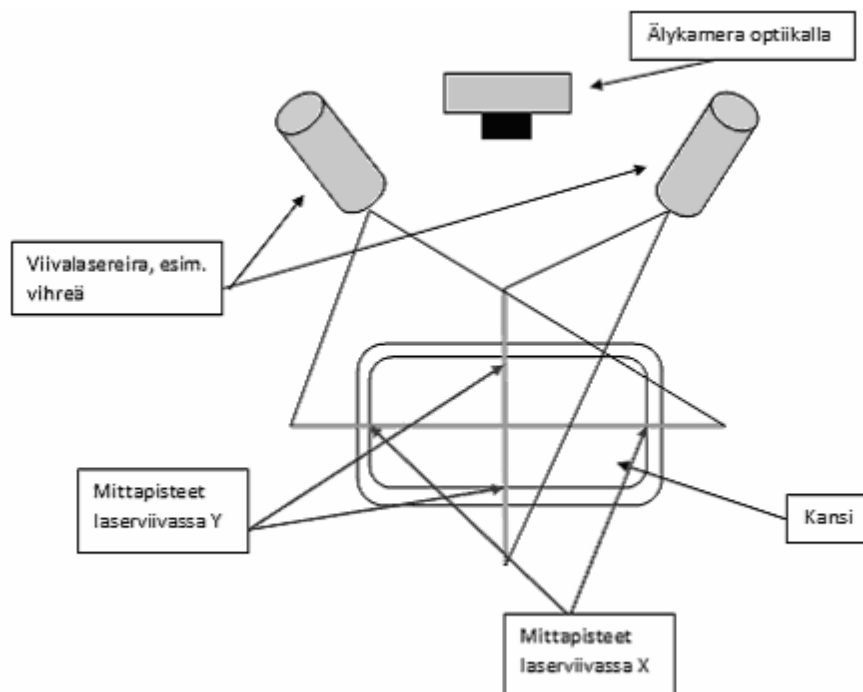


Kuva 37: Systeemillä saatavaa kuvadataa tutkittavasta kannesta.

Laserviivoilla paikallistetaan helposti ja tehokkaasti kannessa olevat hahlot ja niiden pitkittäis- ja poikittaismatka mitataan (lopullisessa ratkaisussa kuva kalibroidaan reaaliaikaisesti). Tällä tavalla on rasian väri ja muoto riippumaton mittauksista.

Kuvassa 38 on hahmoteltu kannen kuvaamisessa käytetty mittausasetelma. Kameran, laserit, kiinnikkeet, optiikat, kaapelointi jne voidaan asentaa suljettuun tilaan, koteloon,

jonne käyttäjä(t) voivat manuaalisesti laittaa kansia mitattavaksi. Älykamera toimii verkkoselaimena ja käyttöliittymä voidaan pitää mittausaseman välittömässä läheisyydessä tai missä tahansa verkossa. Hälytysrajoja/arvoja on mahdollista asettaa ja antaa käyttäjille mahdollisuus tehdä muutoksia/korjauksia.



Kuva 38: Mittausasetelma kansien mittaamiseen.

Tarvittavat komponentit:

Älykamera Matrox Iris GT Design Assistant-ohjelmalla, 1 kpl

Laserit ja virtalähteet, 2 kpl

Kaapelit ja kiinnikkeet

Kotelointi

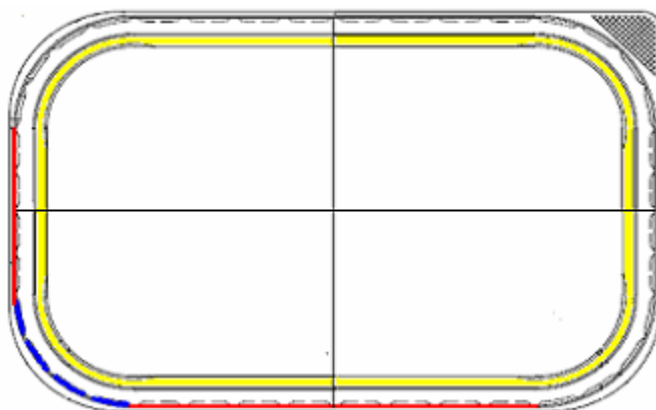
Käyttöliittymä

(Lähde: Kim Grundström/Cheos)

Esimerkki 3:

Kansien otostarkastukseen etsitään sopivaa mittaussysteemiä. Maksimiajaksi ehdotettu mittausprosessiin ehdotettu 30 s/kansi, jolloin esimerkiksi sadan kannen mittaaminen tapahtuisi noin tunnissa. Todellisuudessa mittaamiseen käytettävä aika tulee olemaan lyhyempi, esimerkiksi 10 s/kansi on suhteellisen helppo saavuttaa. Systeemin joustavuus mitattavien kappaleiden suhteen sekä mahdollinen siirrettävyys tarvittaessa olisivat toivottuja ominaisuuksia. Tällöin mittauksia voitaisiin suorittaa myös muualla kuin tuotantotiloissa, esimerkiksi laboratoriossa.

Kannesta mitattaisiin sovitemittoja, mutta lisäksi kuvassa 39 keltaisella korostettua uraa voitaisiin käyttää eräänlaisena referenssireunana, johon mittaus olisi sidottavissa. Keltainen ura ei siis ole varsinaisen mittauksen kannalta kiinnostava, mutta jos mittaus voitaisiin sijoittaa suhteellisesti siihen uraan, se voisi helpottaa mittauksen toteuttamista ja referenssialue voitaisiin sisällyttää samaan kuvaan tai skannausdataan. Näin voitaisiin lisäksi mitata aito 3D-ristimitta.

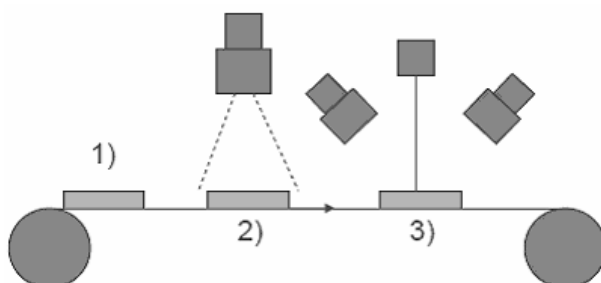


Kuva 39: Kannen kuvasta keltaisella korostettu ura, jota on ehdotettu käytettäväksi referenssireunana mittauksessa.

Ehdotettavaksi on valittu kaksi erilaista mittausmenetelmää, joiden ominaisuuksia, etuja ja haittoja esitellään seuraavaksi.

3D-skannaus (laserviiva + kamera = kolmiomittaus):

Käytettävä teknologia on tunnettua ja laajasti sovellettua, ja saatavilla on valmiita mitta-laittekomponentteja, joista voidaan rakentaa sopiva järjestelmä. Esimerkiksi liukuhihna-toimisena järjestelmästä (kuva 40) voidaan tehdä hyvin tehokas, koska tällöin kappaleen liikettä käytetään hyväksi kuvanmuodostuksessa. Tällöin kappaleet syötetään systeemiin yksittäin, peräjäälkeen. Ongelmana tällaisissa systeemeissä on, että väistämättä osa koh-teesta jää ”varjoon” mittausgeometriasta johtuen. Tämä ongelma on kuitenkin korjatta-vissa kuvaamalla kohdetta kahdesta tai useammasta kulmasta.

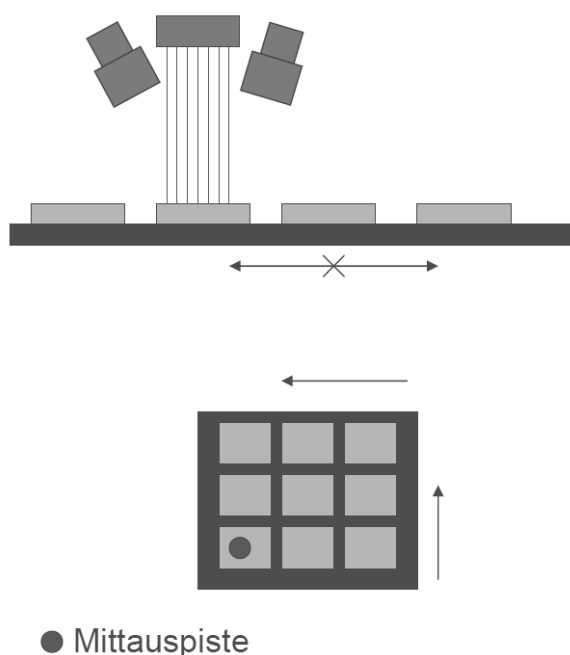


Kuva 40: Esimerkkikonsepti kokonaisuudesta, jossa kansien liikuttamiseen käyteeään liukuhihnasysteemiä. Kohdassa 1) tapahtuu mitattavan kohteen syöttö järjestelmään. Kohdassa 2) kamera ottaa kuvan, josta mitataan kohteen asento 3D-mittauksen ase-mointia varten. Kohdassa 3) suoritetaan profiilin 3D-skannaus kahdesta eri suunnasta.

Kuvan 40 mukainen järjestelmä on mahdollista rakentaa melko kompaktiksi ja siirrettäväksi. Kappalekohtaisesti erilaisia vaatimuksia voi olla esimerkiksi syvyys FOV:n sekä katvealueiden suhteen. Laserkolmiomittauksessa z-suunnassa (syvyys) saavutettava tarkkuus riippuu käytetystä kuva-alasta ja tietysti itse sensorista. Valtaosalla kaupallisista 3D-kolmiomittausantureista noin 0,01 mm syvyystarkkuuteen pääseminen vaatii noin 50 mm kuva-alaa (x-suunta). Tarkkuutta x- ja y-suunnissa voidaan kontrolloida osin liikkeen nopeuden avulla, ja osin valitsemalla anturi, jossa on riittävästi resoluutiota. Kansien dimensiomittauksissa z-suunta ei ole tulosten kannalta primäärinen, vaan merkittävämpiä ovat x- ja y-suunnat.

Stereokamerakuvaus strukturoitua valoa käyttäen:

Stereokamerakuvaukseen perustuvalla systeemillä (kuva 41) saadaan muodostettua kerralla 3D-näkymä kohteesta. Monimutkaisemmat kohteet vaatisivat tällöin kuitenkin useamman kuvan ottamista eri kulmista, eli käytännössä kohteen liikuttamista eri asen-toihin, mihin sisältyy tahtiaikahaasteita. Tällaisen systeemin ongelmana on myös se, että systeemi on käytännössä rakennettava erillisistä komponenteista, jolloin kalibrointi tulee vaatimaan sovelluskehitystä.



Kuva 41: Esimerkkikuva stereokamerakuvaukseen perustuvasta systeemistä.

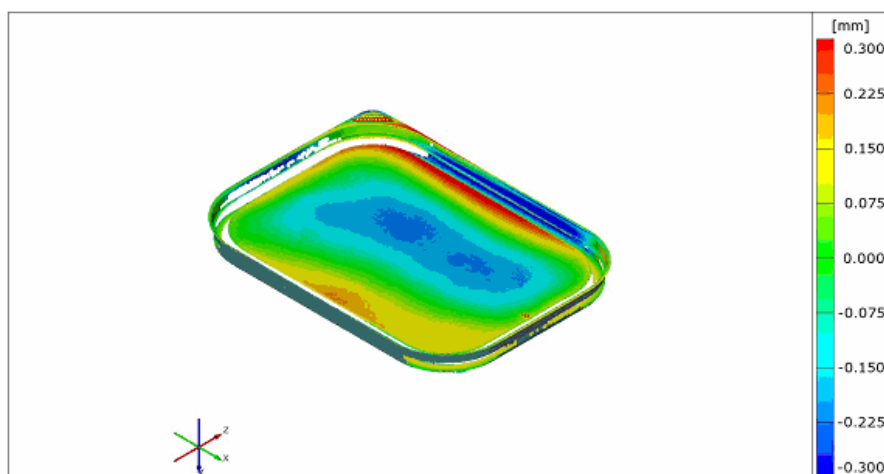
Kuvan 41 mukainen kuvantamisjärjestelmä koostuu stereokameraparista sekä strukturoidusta valosta (projektor). Systeemissä liikutellaan joko kamera + projektorikokonaisuutta tai komponenttipalettia. Tällaisen järjestelmän skaalautuminen erikokoisille kohteille saattaa tosin osoittautua haasteelliseksi (kuva-alan muokkaus, liikesarjojen opetus, jne.). Lisäksi haasteena ovat myös mahdollisesti ”pimentoon” jäävät kohteen osat.

(Lähde: Kimmo Jokinen/Optofidelity)

Esimerkki 4:

3D-tarkastuksiin erikoistunut yritys ehdottaa käytettäväksi GOM:n ATOS-systeemiä. Laitteistoja on markkinoilla kolme keskenään hieman erilaista: kaksi eri mallia versiosta ATOS I ja yksi malli versiosta ATOS II. ATOS I on skannerityyppinen ja erot eri mallien välillä ovat pikselimäärässä. Suuremmalla pikselimäärällä voidaan skannata paremmin yksityiskohtia suuremmalla mittausvolumilla. ATOS I malli soveltuu parhaiten mittauksiin, jotka tehdään ”käsini”, eli joissa käytetään käsikäyttöistä skanneria. ATOS II taas on tarkempi laitteisto, joka on rakennettu 24/7 mittauksen vaatimukset täyttäväksi.

ATOS systeemin toiminta perustuu kolmionmittauksen periaatteisiin: sensoriyksikkö projektoi viivakuvioita mitattavalle kohteelle ja lukee niitä kahdella kameralla, systeemi tarkistaa itsenäisesti kalibrointinsa ja ympäröivien olosuhteiden vaikutukset, tietokone laskee optiikan yhtälöiden avulla automaattisesti 3D koordinaatit kullekin kameran pikselille suurella tarkkuudella. Riippuen kameran resoluutiosta, saadaan aikaan pistepilvi, jopa neljästä miljoonasta kohteen pinnan pisteestä jokaisessa mittauksessa. Mittaustulokset muunnetaan automaattisesti kohteen koordinaatistoon (kuva 42), josta suoritetaan halutut mittaukset. Koordinaatistoon muodostunutta kuvaa voidaan myös verrata kohteen CAD-kuvaan.



Kuva 42: ATOS-systeemillä saatava 3D-kuva kannesta.

Kansien mittaamiseen on ehdotettu ATOS I SO-systeemiä 2Mpx kameralla ja pienellä pyörivällä pöydällä. Atos SO (small objects) systeemi soveltuu parhaiten pienten kohteiden mittaamiseen, mutta se voidaan myöhemmin päivittää myös suurempia kohteita varten tarvittaessa. Tällainen päivitys edellyttää vain uutta kuvakehystä kameraan, uusia linsskejä ja kalibrointilaitteistoa.

(Lähde: Johan Lundell/Cascade)

Esimerkki 5:

Viimeisessä ehdotuksessa kansien mittaamiseen tarjotaan kahta erilaista vaihtoehtoa. Ensimmäisessä vaihtoehdossa käytettäisiin VISI50 Smart -kameraa vastavalolla. Tämän kameran vakiomittaustoimintoja ovat reunan sijainnin mittaus, keskeisyyden mittaus, leveyden mittaus, kappaleen keskipisteen määrittäminen sekä kappalemäärän laskenta. Systeemi on vapaasti ohjelmoitavissa asiakaskohtaisiin sovelluksiin. Se voi toimia täysin itsenäisenä valvonta- tai ohjauslaitteena tai voidaan liittää automaatiojärjestelmään. Kansi asetetaan vastavalon päälle ja kameralle annetaan mittauskomento. Tällöin kamera mittaa esimerkiksi halutun pituuden, leveyden ja pinta-alan. Mittaus on hyvin nopea, kestää alle 100 ms ja saavutettava tarkkuus on luokkaa 0,1 mm. Mittaamisen jälkeen kamera lähettää tiedon esimerkiksi PC:lle tai tekee itsenäisesti hyvä/huono -päätöksen ja ilmaisee sen.

Toinen vaihtoehto on Leuze LSIS 400i-älykamera vastavalolla. Systeemille opetetaan hyvä kappale ja sopivat toleranssit, asetetaan kappale mitta-alueelle ja annetaan mittauskomento. Laite kertoo, onko kappale toleranssien sisällä vai ei. Tällaisella systeemillä ei mittaustuloksia saada automaattisesti ulos, mikä voi olla ongelma.

(Lähde: Matti Hytölä/SKS Vision Systems)

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli löytää erilaisia konenäköratkaisuja lämpömuovattavien polypropeenikansien laadunvalvonnan kehittämiseen siten, että kansien dimensioiden mittaaminen saadaan laadunvalvonnassa tapahtumaan tarkasti ja luotettavasti. Kansien mittaamisen tarve johtuu niissä tapahtuvasta jälkikutistumasta, joka aiheuttaa ongelmia esimerkiksi kansien ja rasioiden yhteensopivuuden suhteen.

Laadunvalvontaprosessi on monivaiheinen tapahtumaketju, jonka aikana arvioidaan valvottavaa piirrettä esimerkiksi erilaisten mittausten avulla, verrataan mittaustuloksia asetettuihin tavoitteisiin ja lopuksi suoritetaan tarvittaessa korjaavat toimenpiteet. Kansien laadunvalvonnassa niiden mittaaminen on se prosessin vaihe, jonka kehittämiseen tässä työssä on etsitty ratkaisuja. Mittaustulosten perusteella tehtäviin toimenpiteisiin ei siis ole juurikaan otettu kantaa. Koska laadunvalvonnan perimmäisenä tavoitteena on prosessien ja tuotteiden laadun parantaminen, täytyy kansienkin osalta tiettyihin toimenpiteisiin ryhtyä, jos kansille tehtyjen mittausten tulokset eivät vastaa tavoitteita. Esimerkiksi lämpömuovausparametreja ja käytettävän muovimateriaalin raaka-ainekoostumusta hallitsemalla voidaan vaikuttaa kansien muovautumiseen ja lopullisiin mittoihin. Työn teoriaosuudessa onkin kerrottu myös esimerkiksi muovituotteiden kutistuman hallintaan liittyviä perusasioita.

Kutistuminen on erityisesti muovituotteille ominainen piirre, josta seuraa erilaisia ongelmia esimerkiksi kappaleiden kokoonpanoon liittyen. Differentiaalinen kutistuma taas aiheuttaa muovituotteiden vääntyilemistä ja taipumista. Esimerkiksi lämpömuovausprosessin seurauksena kappaleissa tapahtuu aina jonkin verran kutistumista, jonka määrään vaikuttavat materiaaliominaisuudet ja prosessointiparametrit. Esimerkiksi työssä tutkitavien kansien kutistuma vaihtelee myös muottipesäkohtaisesti, johtuen mm. monipesämuotin eri alueilla vallitsevista erilaisista olosuhteista lämpötilan suhteen. Muottipesäkohtaisten kutistuman eroihin voidaan vaikuttaa esimerkiksi pyrkimällä mahdollisimman tasaiseen lämpötila-alueeseen koko muotin alueella. Muovituotteiden kutistumista voidaan jonkun verran hallita esimerkiksi vaikuttamalla materiaalin kiteytymisnopeuteen sen jäähtyessä lämpömuovausprosessin jälkeen. Kutistuman hallinnassa kyse ei kuitenkaan ole siitä, tapahtuuko kutistumista, vaan enemmänkin siitä kuinka paljon sitä tapahtuu.

Kansille tehdyt kutistumismittaukset suoritettiin videomittalaitteella, jonka käyttöön liittyi rajoitteita esimerkiksi mitattavan kannen värin ja mitattavaksi valittujen piirteiden

suhteen. Mittauksia suunniteltaessa jouduttiinkin tekemään joitain kompromisseja, min-
kä vuoksi tutkimusosiossa esiteltyt mittaustulokset eivät ole suoraan hyödynnettävissä
esimerkiksi kansien kriittisten mittojen kutistumaa arvioitaessa. Tarve uudelle mitta-
systeemille vahvistui siis entisestään kutistumismittauksia tehtäessä ja uudella laitteella
voikin olla tarpeen suorittaa kutistumismittauksia uudelleen, jotta eri kansityyppien ku-
tistumiskäyttäytymisestä saataisiin luotettavaa tietoa hyödynnettäväksi esimerkiksi ku-
tistuman arvioimiseen jatkossa.

Erilaisia konenäkösystemejä hyödynnetään nykyään varsin laajasti tuotantoteollisuu-
den prosessin- ja laadunvalvonnassa. Konenäön merkittävä etu erityisesti mittaustehtä-
vissä on sen tarkkuus ja luotettavuus. Mittaustulokset saadaan myös helposti talteen ja
sovelluksesta riippuen niitä voidaan myös käsitellä. Esimerkiksi kansien mittaamisen
kohdalla konenäkösystemin ominaisuuksiin voi mittaamisen ja mittaustulosten tilas-
toinnin ja tallentamisen lisäksi kuulua myös tietyn prosentuaalisen kutistuman huomi-
ointi kansien mitoissa. Kansien mittaamiseen konenäkötekniikan alueelta löytyi erilaisia
vaihtoehtoisia ratkaisuja, jotka perustuivat vaihtelevasti esimerkiksi harmaasävykuva-
ukseen, 3D-tekniikkaan ja laserviivamittaukseen. Laadunvalvonnan kehittämisen kan-
nalta jatkotoimenpiteinä erilaisille konenäkösystemien välillä voidaan tehdä tarkempaa
vertailua esimerkiksi käyttöominaisuuksien, joustavuuden ja kustannusten suhteen. Kun
sopiva systeemi on valittu, voidaan projekti saattaa loppuun ja kansien laadunvalvonta
mittaamisen suhteen aloittaa.

LÄHTEET

A guide to thermoform processing of polypropylene. CPC Congdon Plastics Consulting. 2010. [verkkodokumentti]. 8 p. [viitattu 12.2.2011]. Saatavissa: <http://congdonplasticsconsulting.com/ts/sheet/PP%20Thermoforming.pdf>

ASM Handbook, Volume 17 – Nondestructive Evaluation and Quality Control. 1989. Toim. ASM International Handbook Committee. ASM International. 994 s. [Hornberg, 2006.]

Hornberg, A. 2006. Handbook of machine vision. Wiley-VCH. Weinheim. 798 s.

Basic Quality Control Concepts. 2010. Philosophie - A Thoughtful Approach to Stuff. [WWW]. [viitattu 29.6.2010]. Saatavissa: <http://philosophie.com/testing/qc/>

Characterization and failure analysis of plastics. 2003. ASM International. 482 s.

Crystallinity in plastics. Zeus industrial products, Inc. 2007 – 2010. [verkkodokumentti]. 9 s. [Viitattu 16.4.2011]. Saatavissa: http://www.zeusinc.com/UserFiles/zeusinc/Documents/technical_newsletters/Zeus_Crystallinity.pdf

Dimensional control/warpage reduction. SpecialChem – Polyolefin Nucleation Center. 2011. [WWW]. [viitattu 10.2.2011]. Saatavissa: <http://www.specialchem4polymers.com/tc/polyolefin-nucleators/index.aspx?id=dimensional-tolerances>

Fischer, J. M. 2003. Handbook of molded part shrinkage and warpage. William Andrew. 252 s.

Hidén, S. 2001. Syvävedettyjen polypropeenituotteiden laadun vaihtelu. Insinööritoimisto. Tampereen ammattikorkeakoulu. Prosessiteknikan osasto. 43 s.

Illig, A. 2001. Thermoforming – A Practical Guide. Hanser Verlag, Munich. 290 s.

Jokinen, K. 2009. Optical 3D measurement in the production line – 3D projects in practice. Seminaariesitys. Optofidelity Oy. 32 s.

Juran, J.M., Godfrey, A.B. 1999. Juran's Quality Handbook. Section 4: Quality Control Process. 5. painos. McGraw-Hill. 1872 s.

Karjalainen, Jarmo. 2010. Tekninen asiantuntija. Huhtamäki Consumer Goods Finland Oy. Hämeenlinna. Tutustumiskierros kansituotannossa, haastattelu 16.6.2010

Kiviö, H., Salmi, J., Tauren, T. & Tikka, H. 2002. Tampereen teknillisen yliopiston raportti nro 57: Koordinaatiomittauskyvyn testaus ja mittausohjeita. Tuotantotekniikan laitos. 103 s.

Konenäkö tuotantoautomaatiossa. 2010. Prusi, T. Kurssin TTE-5210 (Konenäkö tuotantoautomaatiossa) luentokalvot. Tampereen teknillinen yliopisto.

Konenäköpäivä. Tekniikka 2010-messut. 6.10.2010 Jyväskylä. Konenäköyritysten seminaariesitykset ja messuesittelyt.

Laatuakatemia. 2010. Tuurala, T. [WWW]. [viitattu 28.6.2010]. Saatavissa: <http://www.kotiposti.net/tuurala/index.htm>

Maier, C. & Calafut, T. 1998. Polypropylene: the definitive user's guide and databook. William Andrew. 432 s.

Muovimuotoilu, osittain kiteiset muovit. 2011. Vienamo, T. & Nykänen, S. TALSS – University of Art and Design Helsinki. 2011. [WWW]. [Viitattu 3.2.2011]. Saatavissa: <http://www.muovimuotoilu.fi>

Pajunen, J. 2006. Polypropeenin kutistumiskäyttäytyminen syvävedetyillä tuotteilla. Opinnäytetyö. Hämeen ammattikorkeakoulu. 57 s.

Pat. US. H001301. Method for controlling polymer shrinkage. Shell Oil Company. Houston, USA. (Lee, R. W. & Castro, C. O. & Engle, J. L.) Hak.nro 07/875498, 29.4.1992. (5.4.1994). 3 s.

Plastic thermoform design guidelines. Engineers Edge, LCC. 2000-2011. [WWW]. [Viitattu 10.02.2011]. Saatavissa: http://www.engineersedge.com/plastic_thermoform.htm.

Rosato, D.V., Schott, N. R. & Rosato, M. G. 2001. Plastics Institute of America Plastics Engineering, Manufacturing & Data Handbook. Springer. 2200 s.

Rosen, S. R. 2002. Thermoforming: improving process performance. SME. 328 s.

Sandell, R. 2002. Kestomuovien lämpömuovaus. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 164 s.

Shrinkage in plastic processing. Tangram Technology, Ltd. 2007. [verkkodokumentti]. [Viitattu 28.2.2011]. Saatavissa: http://www.tangram.co.uk/TI-Polymer-Shrinkage_in_plastics.html

Thermoforming primer: the secret to clear PP packaging. 2010. MPW Staff. [verkkodokumentti]. [viitattu 16.4.2011]. Saatavissa:

<http://www.plasticstoday.com/articles/thermoforming-primer-secret-clear-pp-packaging>

Throne, J. L. 1996. Technology of thermoforming. Hanser Verlag. 882 s.

Throne, J. L. 2008. Understanding thermoforming. Hansen Verlag. 2. painos. 266 s.

Tikka, H. & Salmi, J. 2001. Tampereen teknillisen yliopiston raportti nro 56: Muovikappaleiden kiinnitys koordinaattimittauksessa. Tuotantotekniikan laitos. 34 s.

Tripathi, D. 2002. Practical guide to polypropylene. Smithers Rapra Publishing. 104 s.

Tybor, P.T., Hurst, W.C., Reynolds, A. E. & Schuler, G. A. 1988. Quality Control – A Model Program for the Food Industry. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.7.2010]. Saatavissa: http://www.efsonline.uga.edu/EFS_NFB/pubs/Quality%20Control.pdf

Valuatlas - Polypropeeni (PP). 2009. Koleva, M. Technical University of Gabrovo. [verkkodokumentti]. 6s. [Viitattu 27.8.2010]. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PP_FI.pdf

Xu, H. & Kazmer, O.D. 2001. Thermoforming shrinkage prediction. [verkkodokumentti]. [Viitattu 16.7.2010]. Saatavissa: http://findarticles.com/p/articles/mi_hb3367/is_9_41/ai_n28870794/

LIITE 1: KUTISTUMISMITTAUSTEN TULOKSET

1. mittaus/yläleveys (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	81,34	81,17	81,14	81,16	81,26	81,26	81,16	81,09	80,84	81,27
Isku 2	81,33	81,19	81,15	81,15	81,26	81,26	81,17	81,12	80,86	81,26
Isku 3	81,29	81,18	81,15	81,16	81,29	81,26	81,16	81,10	80,85	81,26
Isku 4	81,30	81,16	81,14	81,15	81,28	81,26	81,17	81,09	80,85	81,27
Isku 5	81,30	81,16	81,13	81,15	81,27	81,25	81,17	81,09	80,83	81,26
Isku 6	81,32	81,16	81,14	81,16	81,26	81,24	81,16	81,08	80,86	81,27
Isku 7	81,27	81,16	81,14	81,13	81,26	81,25	81,16	81,08	80,85	81,25
Isku 8	81,28	81,16	81,12	81,14	81,27	81,24	81,15	81,08	80,84	81,25
Isku 9	81,25	81,15	81,12	81,16	81,27	81,23	81,15	81,05	80,83	81,26
Isku 10	81,27	81,16	81,15	81,16	81,27	81,24	81,14	81,08	80,87	81,27
ka (mm)	81,30	81,16	81,14	81,15	81,27	81,25	81,16	81,09	80,85	81,26
%	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
kutistumis%	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
kutistuma (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2. mittaus/yläleveys (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	81,26	81,10	81,08	81,09	81,19	81,17	81,11	81,00	80,77	81,19
Isku 2	81,26	81,12	81,09	81,09	81,19	81,18	81,12	81,04	80,78	81,19
Isku 3	81,22	81,12	81,10	81,10	81,23	81,19	81,12	81,03	80,79	81,21
Isku 4	81,24	81,09	81,09	81,09	81,22	81,19	81,12	81,02	80,78	81,20
Isku 5	81,24	81,10	81,08	81,11	81,21	81,18	81,12	81,02	80,77	81,20
Isku 6	81,26	81,10	81,10	81,12	81,21	81,17	81,13	81,02	80,80	81,20
Isku 7	81,21	81,10	81,10	81,09	81,21	81,18	81,12	81,02	80,78	81,20
Isku 8	81,22	81,11	81,08	81,10	81,22	81,17	81,12	81,02	80,78	81,21
Isku 9	81,20	81,09	81,08	81,11	81,22	81,16	81,11	80,98	80,78	81,21
Isku 10	81,22	81,11	81,11	81,11	81,23	81,17	81,10	81,03	80,82	81,23
ka (mm)	81,23	81,11	81,09	81,10	81,21	81,17	81,12	81,02	80,78	81,20
%	99,92 %	99,93 %	99,94 %	99,94 %	99,93 %	99,91 %	99,95 %	99,91 %	99,92 %	99,93 %
kutistumis%	0,08 %	0,07 %	0,06 %	0,06 %	0,07 %	0,09 %	0,05 %	0,09 %	0,08 %	0,07 %
kutistuma (mm)	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,07	0,04	0,07	0,06	0,06
3. mittaus/yläleveys (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	81,23	81,07	81,05	81,06	81,16	81,14	81,08	80,96	80,73	81,17
Isku 2	81,22	81,09	81,06	81,07	81,17	81,15	81,09	81,00	80,74	81,15
Isku 3	81,20	81,10	81,07	81,08	81,20	81,15	81,09	80,99	80,75	81,18
Isku 4	81,21	81,06	81,06	81,08	81,20	81,16	81,10	80,98	80,73	81,17
Isku 5	81,21	81,07	81,05	81,08	81,19	81,14	81,10	80,98	80,74	81,17
Isku 6	81,23	81,07	81,07	81,09	81,18	81,14	81,10	80,98	80,76	81,17
Isku 7	81,19	81,07	81,07	81,07	81,18	81,15	81,09	80,98	80,76	81,17
Isku 8	81,19	81,08	81,05	81,06	81,19	81,13	81,09	80,98	80,74	81,19
Isku 9	81,17	81,07	81,06	81,09	81,19	81,12	81,09	80,95	80,74	81,18
Isku 10	81,19	81,08	81,08	81,08	81,20	81,13	81,08	80,98	80,79	81,20
ka (mm)	81,21	81,08	81,06	81,08	81,18	81,14	81,09	80,98	80,75	81,17
%	99,89 %	99,89 %	99,91 %	99,90 %	99,90 %	99,87 %	99,92 %	99,87 %	99,88 %	99,89 %
kutistumis%	0,11 %	0,11 %	0,09 %	0,10 %	0,10 %	0,13 %	0,08 %	0,13 %	0,12 %	0,11 %
kutistuma (mm)	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,11	0,07	0,11	0,10	0,09

4. mittaus/yläleveys (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	81,20	81,04	81,02	81,04	81,13	81,10	81,06	80,92	80,68	81,13
Isku 2	81,19	81,06	81,03	81,04	81,13	81,11	81,07	80,97	80,71	81,12
Isku 3	81,17	81,06	81,04	81,05	81,17	81,12	81,07	80,96	80,71	81,15
Isku 4	81,18	81,03	81,03	81,04	81,16	81,11	81,07	80,94	80,70	81,13
Isku 5	81,18	81,04	81,02	81,05	81,16	81,11	81,07	80,95	80,71	81,14
Isku 6	81,21	81,05	81,05	81,06	81,15	81,11	81,07	80,94	80,73	81,13
Isku 7	81,16	81,04	81,04	81,04	81,15	81,12	81,07	80,94	80,72	81,14
Isku 8	81,16	81,05	81,02	81,05	81,16	81,09	81,06	80,95	80,71	81,16
Isku 9	81,14	81,03	81,03	81,06	81,16	81,09	81,06	80,92	80,70	81,15
Isku 10	81,16	81,06	81,05	81,05	81,17	81,10	81,06	80,95	80,76	81,18
ka (mm)	81,17	81,05	81,03	81,05	81,15	81,11	81,07	80,95	80,71	81,14
%	99,85 %	99,85 %	99,87 %	99,87 %	99,86 %	99,82 %	99,89 %	99,83 %	99,84 %	99,85 %
kutistumis%	0,15 %	0,15 %	0,13 %	0,13 %	0,14 %	0,18 %	0,11 %	0,17 %	0,16 %	0,15 %
kutistuma (mm)	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,14	0,09	0,14	0,13	0,12
5. mittaus/yläleveys (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	81,18	81,01	81,00	81,02	81,11	81,08	81,04	80,90	80,67	81,11
Isku 2	81,17	81,04	81,01	81,02	81,12	81,09	81,05	80,94	80,68	81,10
Isku 3	81,15	81,04	81,02	81,03	81,15	81,09	81,05	80,94	80,69	81,12
Isku 4	81,16	81,02	81,01	81,03	81,15	81,10	81,05	80,93	80,68	81,11
Isku 5	81,16	81,03	81,01	81,03	81,14	81,09	81,06	80,92	80,69	81,13
Isku 6	81,19	81,03	81,03	81,04	81,13	81,08	81,05	80,92	80,71	81,12
Isku 7	81,14	81,02	81,03	81,02	81,14	81,10	81,05	80,93	80,70	81,12
Isku 8	81,15	81,03	81,00	81,03	81,14	81,07	81,05	80,93	80,69	81,15
Isku 9	81,12	81,01	81,01	81,05	81,14	81,07	81,04	80,89	80,69	81,13
Isku 10	81,14	81,03	81,03	81,04	81,16	81,07	81,03	80,93	80,73	81,16
ka (mm)	81,16	81,03	81,02	81,03	81,14	81,08	81,05	80,92	80,69	81,12
%	99,83 %	99,83 %	99,85 %	99,85 %	99,84 %	99,80 %	99,86 %	99,80 %	99,81 %	99,83 %
kutistumis%	0,17 %	0,17 %	0,15 %	0,15 %	0,16 %	0,20 %	0,14 %	0,20 %	0,19 %	0,17 %
kutistuma (mm)	0,14	0,14	0,13	0,12	0,13	0,16	0,11	0,16	0,15	0,14
6. mittaus/yläleveys (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	81,15	81,00	80,98	80,99	81,08	81,05	81,01	80,88	80,64	81,09
Isku 2	81,15	81,01	80,99	80,99	81,09	81,07	81,03	80,92	80,66	81,08
Isku 3	81,13	81,02	81,00	81,01	81,13	81,07	81,02	80,91	80,67	81,10
Isku 4	81,14	80,99	80,99	81,00	81,12	81,07	81,03	80,90	80,64	81,09
Isku 5	81,14	81,00	80,98	81,01	81,11	81,06	81,04	80,90	80,66	81,10
Isku 6	81,17	81,01	81,01	81,02	81,10	81,06	81,03	80,90	80,69	81,09
Isku 7	81,12	81,00	81,00	81,00	81,11	81,06	81,03	80,89	80,68	81,08
Isku 8	81,12	81,01	80,98	81,00	81,12	81,05	81,03	80,90	80,68	81,13
Isku 9	81,09	80,99	80,99	81,02	81,12	81,04	81,02	80,86	80,67	81,11
Isku 10	81,11	81,01	81,01	81,01	81,13	81,05	81,01	80,90	80,71	81,13
ka (mm)	81,13	81,00	80,99	81,01	81,11	81,06	81,03	80,89	80,67	81,10
%	99,80 %	99,80 %	99,82 %	99,82 %	99,81 %	99,76 %	99,84 %	99,76 %	99,78 %	99,80 %
kutistumis%	0,20 %	0,20 %	0,18 %	0,18 %	0,19 %	0,24 %	0,16 %	0,24 %	0,22 %	0,20 %
kutistuma (mm)	0,16	0,16	0,15	0,15	0,16	0,19	0,13	0,19	0,18	0,16

1. mittaus/alaleveys (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	81,36	81,17	81,11	81,05	81,27	81,20	81,20	81,08	81,09	81,18
Isku 2	81,39	81,18	81,11	81,14	81,29	81,20	81,18	81,13	81,15	81,18
Isku 3	81,35	81,15	81,13	81,06	81,30	81,19	81,18	81,11	81,11	81,22
Isku 4	81,35	81,17	81,11	81,07	81,30	81,17	81,15	81,09	81,16	81,20
Isku 5	81,34	81,14	81,09	81,09	81,30	81,17	81,15	81,12	81,12	81,20
Isku 6	81,33	81,17	81,11	81,10	81,28	81,17	81,19	81,11	81,15	81,19
Isku 7	81,33	81,14	81,08	81,10	81,27	81,17	81,15	81,11	81,13	81,18
Isku 8	81,32	81,13	81,07	81,09	81,27	81,11	81,16	81,06	81,08	81,20
Isku 9	81,32	81,13	81,07	81,12	81,28	81,15	81,15	81,07	81,10	81,20
Isku 10	81,31	81,15	81,08	81,03	81,30	81,15	81,14	81,09	81,14	81,21
ka (mm)	81,34	81,15	81,10	81,08	81,29	81,17	81,16	81,10	81,12	81,20
%	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
kutistumis%	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
kutistuma (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2. mittaus/alaleveys (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	81,28	81,10	81,05	80,98	81,19	81,13	81,13	80,98	81,01	81,11
Isku 2	81,31	81,11	81,05	81,08	81,22	81,14	81,10	81,05	81,07	81,12
Isku 3	81,28	81,09	81,08	81,01	81,23	81,13	81,11	81,03	81,04	81,17
Isku 4	81,28	81,10	81,06	81,00	81,23	81,10	81,09	81,02	81,08	81,14
Isku 5	81,28	81,08	81,04	81,05	81,22	81,12	81,10	81,04	81,05	81,14
Isku 6	81,27	81,11	81,08	81,05	81,22	81,11	81,13	81,04	81,07	81,13
Isku 7	81,26	81,08	81,04	81,05	81,21	81,12	81,10	81,05	81,06	81,13
Isku 8	81,25	81,07	81,03	81,05	81,22	81,07	81,11	80,99	81,02	81,14
Isku 9	81,26	81,07	81,03	81,06	81,22	81,09	81,08	81,00	81,04	81,15
Isku 10	81,25	81,09	81,04	80,98	81,24	81,10	81,09	81,02	81,08	81,15
ka (mm)	81,27	81,09	81,05	81,03	81,22	81,11	81,10	81,02	81,05	81,14
%	99,92 %	99,92 %	99,94 %	99,94 %	99,92 %	99,93 %	99,93 %	99,91 %	99,91 %	99,93 %
kutistumis%	0,08 %	0,08 %	0,06 %	0,06 %	0,08 %	0,07 %	0,07 %	0,09 %	0,09 %	0,07 %
kutistuma (mm)	0,07	0,06	0,05	0,05	0,07	0,06	0,06	0,08	0,07	0,06
3. mittaus/alaleveys (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	81,24	81,07	81,02	80,95	81,16	81,10	81,09	80,94	80,97	81,09
Isku 2	81,27	81,09	81,02	81,05	81,19	81,10	81,07	81,00	81,03	81,08
Isku 3	81,25	81,06	81,04	80,98	81,20	81,09	81,08	80,98	81,01	81,13
Isku 4	81,25	81,08	81,03	80,98	81,20	81,07	81,06	80,98	81,05	81,11
Isku 5	81,25	81,05	81,01	81,02	81,19	81,08	81,06	81,00	81,02	81,11
Isku 6	81,24	81,08	81,05	81,02	81,18	81,07	81,10	81,00	81,03	81,10
Isku 7	81,24	81,06	81,01	81,02	81,18	81,09	81,07	81,00	81,02	81,11
Isku 8	81,21	81,05	81,00	81,01	81,18	81,04	81,08	80,95	80,98	81,11
Isku 9	81,22	81,04	81,01	81,05	81,19	81,06	81,05	80,96	81,00	81,11
Isku 10	81,22	81,06	81,01	80,96	81,21	81,06	81,06	80,98	81,04	81,12
ka (mm)	81,24	81,06	81,02	81,00	81,19	81,08	81,07	80,98	81,02	81,11
%	99,88 %	99,89 %	99,91 %	99,90 %	99,88 %	99,89 %	99,89 %	99,86 %	99,87 %	99,89 %
kutistumis%	0,12 %	0,11 %	0,09 %	0,10 %	0,12 %	0,11 %	0,11 %	0,14 %	0,13 %	0,11 %
kutistuma (mm)	0,10	0,09	0,08	0,08	0,10	0,09	0,09	0,12	0,11	0,09

4. mittaus/alaleveys (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	81,21	81,04	80,99	80,92	81,13	81,07	81,06	80,91	80,93	81,05
Isku 2	81,24	81,06	81,00	81,03	81,16	81,08	81,04	80,97	81,00	81,05
Isku 3	81,22	81,03	81,02	80,96	81,16	81,07	81,06	80,96	80,97	81,10
Isku 4	81,22	81,05	81,00	80,95	81,16	81,04	81,03	80,94	81,02	81,08
Isku 5	81,22	81,02	80,99	81,00	81,16	81,06	81,04	80,97	80,98	81,08
Isku 6	81,22	81,05	81,02	81,00	81,15	81,05	81,07	80,97	80,99	81,06
Isku 7	81,21	81,03	80,99	81,00	81,15	81,07	81,05	80,98	81,00	81,08
Isku 8	81,18	81,02	80,97	80,99	81,15	81,01	81,04	80,91	80,95	81,08
Isku 9	81,20	81,01	80,98	81,02	81,16	81,03	81,03	80,93	80,97	81,08
Isku 10	81,19	81,03	80,98	80,92	81,18	81,03	81,03	80,95	81,01	81,09
ka (mm)	81,21	81,03	80,99	80,98	81,16	81,05	81,05	80,95	80,98	81,07
%	99,84 %	99,85 %	99,87 %	99,87 %	99,84 %	99,85 %	99,85 %	99,82 %	99,83 %	99,85 %
kutistumis%	0,16 %	0,15 %	0,13 %	0,13 %	0,16 %	0,15 %	0,15 %	0,18 %	0,17 %	0,15 %
kutistuma (mm)	0,13	0,12	0,10	0,11	0,13	0,12	0,12	0,15	0,14	0,12
5. mittaus/alaleveys (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	81,19	81,02	80,97	80,91	81,11	81,05	81,04	80,88	80,92	81,04
Isku 2	81,22	81,04	80,97	81,01	81,14	81,05	81,02	80,94	80,97	81,03
Isku 3	81,20	81,01	81,00	80,93	81,14	81,05	81,04	80,94	80,95	81,07
Isku 4	81,20	81,03	80,98	80,94	81,15	81,02	81,01	80,92	81,00	81,06
Isku 5	81,20	81,01	80,98	80,98	81,15	81,04	81,02	80,95	80,96	81,07
Isku 6	81,20	81,04	81,01	80,98	81,14	81,03	81,05	80,94	80,97	81,05
Isku 7	81,18	81,00	80,97	80,98	81,13	81,05	81,03	80,95	80,98	81,06
Isku 8	81,17	81,00	80,96	80,98	81,13	80,99	81,02	80,89	80,93	81,06
Isku 9	81,17	80,99	80,96	81,00	81,14	81,01	81,01	80,90	80,95	81,06
Isku 10	81,16	81,01	80,96	80,92	81,16	81,01	81,01	80,92	80,99	81,07
ka (mm)	81,19	81,02	80,98	80,96	81,14	81,03	81,03	80,92	80,96	81,06
%	99,82 %	99,83 %	99,85 %	99,85 %	99,82 %	99,83 %	99,83 %	99,79 %	99,80 %	99,83 %
kutistumis%	0,18 %	0,17 %	0,15 %	0,15 %	0,18 %	0,17 %	0,17 %	0,21 %	0,20 %	0,17 %
kutistuma (mm)	0,15	0,14	0,12	0,12	0,15	0,14	0,14	0,17	0,16	0,14
6. mittaus/alaleveys (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	81,17	81,00	80,95	80,88	81,08	81,02	81,02	80,85	80,89	81,01
Isku 2	81,20	81,02	80,95	80,98	81,11	81,04	81,00	80,92	80,95	81,00
Isku 3	81,18	80,98	80,98	80,92	81,12	81,03	81,01	80,90	80,92	81,05
Isku 4	81,18	81,01	80,96	80,91	81,12	80,99	80,99	80,89	80,97	81,04
Isku 5	81,18	80,98	80,95	80,95	81,12	81,01	80,99	80,92	80,93	81,03
Isku 6	81,17	81,02	80,99	80,96	81,11	81,00	81,03	80,92	80,95	81,01
Isku 7	81,16	80,98	80,95	80,96	81,10	81,02	81,00	80,92	80,95	81,03
Isku 8	81,14	80,98	80,94	80,95	81,11	80,97	81,00	80,86	80,91	81,03
Isku 9	81,15	80,98	80,94	80,98	81,12	80,99	80,99	80,88	80,93	81,03
Isku 10	81,14	80,98	80,94	80,89	81,13	80,99	80,99	80,90	80,97	81,05
ka (mm)	81,17	80,99	80,96	80,94	81,11	81,01	81,00	80,90	80,94	81,03
%	99,79 %	99,80 %	99,83 %	99,82 %	99,79 %	99,80 %	99,80 %	99,75 %	99,77 %	99,79 %
kutistumis%	0,21 %	0,20 %	0,17 %	0,18 %	0,21 %	0,20 %	0,20 %	0,25 %	0,23 %	0,21 %
kutistuma (mm)	0,17	0,16	0,14	0,15	0,17	0,16	0,16	0,20	0,19	0,17

1. mittaus/vasen pituus (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
lsku 1	131,60	131,38	131,41	131,35	131,54	131,49	131,36	131,34	131,38	131,46
lsku 2	131,57	131,37	131,39	131,38	131,54	131,48	131,36	131,36	131,41	131,47
lsku 3	131,55	131,36	131,39	131,33	131,54	131,49	131,36	131,33	131,36	131,47
lsku 4	131,59	131,36	131,36	131,34	131,54	131,48	131,35	131,34	131,38	131,46
lsku 5	131,56	131,34	131,36	131,35	131,54	131,47	131,35	131,31	131,38	131,45
lsku 6	131,57	131,34	131,39	131,34	131,51	131,46	131,36	131,32	131,38	131,46
lsku 7	131,54	131,33	131,37	131,35	131,52	131,46	131,33	131,31	131,35	131,45
lsku 8	131,56	131,33	131,32	131,33	131,53	131,46	131,36	131,32	131,34	131,48
lsku 9	131,52	131,31	131,36	131,35	131,53	131,46	131,34	131,30	131,38	131,45
lsku 10	131,52	131,35	131,39	131,29	131,54	131,45	131,33	131,33	131,38	131,47
ka (mm)	131,56	131,35	131,37	131,34	131,53	131,47	131,35	131,33	131,37	131,46
%	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
kutistumis%	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
kutistuma (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2. mittaus/vasen pituus (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
lsku 1	131,49	131,30	131,30	131,25	131,42	131,37	131,27	131,21	131,28	131,36
lsku 2	131,46	131,30	131,29	131,29	131,43	131,36	131,28	131,25	131,32	131,35
lsku 3	131,45	131,29	131,30	131,25	131,44	131,38	131,26	131,22	131,26	131,36
lsku 4	131,48	131,29	131,28	131,27	131,44	131,39	131,28	131,24	131,29	131,35
lsku 5	131,46	131,27	131,29	131,28	131,45	131,38	131,29	131,22	131,29	131,36
lsku 6	131,48	131,27	131,30	131,26	131,41	131,39	131,29	131,22	131,30	131,37
lsku 7	131,46	131,27	131,29	131,28	131,42	131,37	131,26	131,22	131,28	131,35
lsku 8	131,46	131,26	131,24	131,26	131,44	131,38	131,29	131,23	131,26	131,38
lsku 9	131,44	131,25	131,27	131,28	131,43	131,37	131,27	131,22	131,30	131,36
lsku 10	131,43	131,30	131,31	131,23	131,45	131,37	131,27	131,25	131,30	131,38
ka (mm)	131,46	131,28	131,29	131,26	131,43	131,38	131,28	131,23	131,29	131,36
%	99,93 %	99,95 %	99,93 %	99,94 %	99,92 %	99,93 %	99,94 %	99,92 %	99,93 %	99,93 %
kutistumis%	0,07 %	0,05 %	0,07 %	0,06 %	0,08 %	0,07 %	0,06 %	0,08 %	0,07 %	0,07 %
kutistuma (mm)	0,10	0,07	0,09	0,08	0,10	0,09	0,07	0,10	0,09	0,10
3. mittaus/vasen pituus (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
lsku 1	131,44	131,27	131,25	131,21	131,37	131,33	131,24	131,17	131,24	131,31
lsku 2	131,42	131,27	131,26	131,25	131,38	131,33	131,24	131,20	131,28	131,31
lsku 3	131,41	131,25	131,27	131,22	131,38	131,34	131,24	131,17	131,22	131,31
lsku 4	131,44	131,26	131,24	131,24	131,39	131,35	131,26	131,21	131,25	131,31
lsku 5	131,42	131,24	131,25	131,24	131,40	131,32	131,25	131,18	131,25	131,31
lsku 6	131,44	131,23	131,26	131,22	131,37	131,34	131,26	131,18	131,26	131,32
lsku 7	131,44	131,24	131,26	131,24	131,37	131,32	131,22	131,17	131,23	131,31
lsku 8	131,43	131,23	131,21	131,22	131,39	131,33	131,26	131,19	131,21	131,33
lsku 9	131,40	131,22	131,24	131,24	131,39	131,34	131,24	131,17	131,26	131,31
lsku 10	131,41	131,27	131,27	131,19	131,40	131,33	131,23	131,20	131,25	131,34
ka (mm)	131,42	131,25	131,25	131,23	131,38	131,33	131,24	131,18	131,24	131,32
%	99,90 %	99,92 %	99,91 %	99,91 %	99,89 %	99,90 %	99,92 %	99,89 %	99,90 %	99,89 %
kutistumis%	0,10 %	0,08 %	0,09 %	0,09 %	0,11 %	0,10 %	0,08 %	0,11 %	0,10 %	0,11 %
kutistuma (mm)	0,13	0,10	0,12	0,11	0,15	0,14	0,11	0,14	0,13	0,14

4. mittaus/vasen pituus (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
lsku 1	131,40	131,22	131,21	131,18	131,32	131,29	131,20	131,12	131,19	131,26
lsku 2	131,37	131,22	131,21	131,21	131,33	131,28	131,20	131,15	131,23	131,27
lsku 3	131,37	131,22	131,22	131,17	131,33	131,29	131,20	131,13	131,18	131,27
lsku 4	131,40	131,22	131,20	131,19	131,35	131,30	131,22	131,16	131,21	131,27
lsku 5	131,38	131,19	131,20	131,20	131,35	131,29	131,21	131,13	131,20	131,27
lsku 6	131,40	131,20	131,22	131,19	131,32	131,30	131,22	131,14	131,22	131,28
lsku 7	131,38	131,20	131,21	131,20	131,33	131,28	131,19	131,13	131,19	131,26
lsku 8	131,39	131,19	131,17	131,19	131,35	131,29	131,22	131,14	131,16	131,29
lsku 9	131,37	131,18	131,20	131,21	131,34	131,30	131,21	131,12	131,21	131,27
lsku 10	131,36	131,23	131,25	131,15	131,35	131,29	131,20	131,16	131,21	131,29
ka (mm)	131,38	131,21	131,21	131,19	131,34	131,29	131,21	131,14	131,20	131,27
%	99,87 %	99,89 %	99,88 %	99,88 %	99,85 %	99,86 %	99,89 %	99,85 %	99,87 %	99,86 %
kutistumis%	0,13 %	0,11 %	0,12 %	0,12 %	0,15 %	0,14 %	0,11 %	0,15 %	0,13 %	0,14 %
kutistuma (mm)	0,18	0,14	0,16	0,15	0,20	0,18	0,14	0,19	0,17	0,19
5. mittaus/vasen pituus (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
lsku 1	131,37	131,21	131,20	131,16	131,30	131,26	131,18	131,09	131,16	131,24
lsku 2	131,35	131,20	131,19	131,19	131,31	131,26	131,19	131,13	131,21	131,25
lsku 3	131,34	131,19	131,21	131,16	131,31	131,27	131,19	131,11	131,16	131,25
lsku 4	131,38	131,20	131,18	131,18	131,32	131,27	131,20	131,13	131,18	131,25
lsku 5	131,35	131,17	131,18	131,18	131,33	131,26	131,19	131,10	131,18	131,25
lsku 6	131,37	131,17	131,19	131,16	131,30	131,27	131,21	131,11	131,20	131,25
lsku 7	131,36	131,18	131,20	131,18	131,30	131,25	131,16	131,10	131,16	131,23
lsku 8	131,37	131,17	131,15	131,17	131,32	131,26	131,20	131,11	131,15	131,26
lsku 9	131,34	131,16	131,18	131,18	131,31	131,27	131,19	131,10	131,19	131,24
lsku 10	131,33	131,21	131,22	131,13	131,32	131,26	131,17	131,13	131,19	131,27
ka (mm)	131,36	131,19	131,19	131,17	131,31	131,26	131,19	131,11	131,18	131,25
%	99,85 %	99,88 %	99,86 %	99,87 %	99,83 %	99,84 %	99,88 %	99,83 %	99,85 %	99,84 %
kutistumis%	0,15 %	0,12 %	0,14 %	0,13 %	0,17 %	0,16 %	0,12 %	0,17 %	0,15 %	0,16 %
kutistuma (mm)	0,20	0,16	0,18	0,17	0,22	0,21	0,16	0,22	0,20	0,21
6. mittaus/vasen pituus (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
lsku 1	131,34	131,18	131,16	131,13	131,27	131,22	131,15	131,05	131,13	131,21
lsku 2	131,32	131,18	131,16	131,16	131,27	131,23	131,16	131,10	131,18	131,22
lsku 3	131,31	131,17	131,18	131,13	131,27	131,23	131,16	131,07	131,13	131,22
lsku 4	131,34	131,17	131,15	131,15	131,28	131,24	131,17	131,10	131,15	131,22
lsku 5	131,32	131,15	131,16	131,15	131,29	131,23	131,16	131,07	131,15	131,22
lsku 6	131,33	131,14	131,17	131,13	131,27	131,24	131,18	131,08	131,16	131,22
lsku 7	131,33	131,16	131,17	131,15	131,27	131,21	131,14	131,06	131,13	131,20
lsku 8	131,32	131,14	131,12	131,14	131,29	131,23	131,17	131,08	131,12	131,23
lsku 9	131,30	131,13	131,14	131,16	131,28	131,23	131,16	131,06	131,15	131,21
lsku 10	131,29	131,18	131,19	131,11	131,29	131,23	131,15	131,10	131,15	131,23
ka (mm)	131,32	131,16	131,16	131,14	131,28	131,23	131,16	131,08	131,15	131,22
%	99,82 %	99,86 %	99,84 %	99,85 %	99,81 %	99,82 %	99,85 %	99,81 %	99,83 %	99,82 %
kutistumis%	0,18 %	0,14 %	0,16 %	0,15 %	0,19 %	0,18 %	0,15 %	0,19 %	0,17 %	0,18 %
kutistuma (mm)	0,24	0,19	0,21	0,20	0,25	0,24	0,19	0,25	0,23	0,24

1. mittaus/oikea pituus (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
lsku 1	131,54	131,50	131,30	131,34	131,56	131,53	131,47	131,35	131,35	131,50
lsku 2	131,53	131,48	131,33	131,40	131,55	131,52	131,47	131,35	131,39	131,50
lsku 3	131,50	131,47	131,31	131,35	131,54	131,51	131,47	131,33	131,34	131,52
lsku 4	131,51	131,45	131,32	131,34	131,55	131,49	131,45	131,32	131,35	131,49
lsku 5	131,51	131,46	131,32	131,35	131,54	131,50	131,44	131,36	131,32	131,50
lsku 6	131,52	131,48	131,35	131,35	131,52	131,48	131,45	131,34	131,35	131,50
lsku 7	131,49	131,45	131,32	131,36	131,52	131,49	131,44	131,30	131,33	131,49
lsku 8	131,50	131,46	131,28	131,34	131,53	131,47	131,46	131,34	131,33	131,50
lsku 9	131,46	131,42	131,30	131,38	131,54	131,48	131,46	131,32	131,35	131,49
lsku 10	131,48	131,43	131,31	131,31	131,54	131,46	131,43	131,34	131,36	131,50
ka (mm)	131,51	131,46	131,31	131,35	131,54	131,49	131,45	131,34	131,35	131,50
%	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
kutistumis%	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
kutistuma (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2. mittaus/oikea pituus (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
lsku 1	131,43	131,40	131,19	131,24	131,45	131,41	131,37	131,22	131,24	131,38
lsku 2	131,43	131,39	131,23	131,31	131,45	131,40	131,37	131,23	131,29	131,39
lsku 3	131,41	131,38	131,23	131,27	131,45	131,40	131,35	131,22	131,24	131,42
lsku 4	131,41	131,37	131,24	131,26	131,45	131,39	131,37	131,23	131,27	131,39
lsku 5	131,42	131,39	131,24	131,28	131,45	131,41	131,37	131,26	131,23	131,40
lsku 6	131,44	131,40	131,25	131,27	131,43	131,41	131,37	131,25	131,26	131,40
lsku 7	131,40	131,37	131,24	131,28	131,42	131,40	131,35	131,20	131,26	131,39
lsku 8	131,42	131,38	131,21	131,26	131,44	131,39	131,37	131,24	131,24	131,41
lsku 9	131,38	131,34	131,22	131,31	131,45	131,39	131,36	131,22	131,27	131,41
lsku 10	131,41	131,36	131,22	131,24	131,45	131,38	131,36	131,25	131,27	131,41
ka (mm)	131,42	131,38	131,23	131,27	131,44	131,40	131,36	131,23	131,26	131,40
%	99,93 %	99,94 %	99,93 %	99,94 %	99,93 %	99,93 %	99,93 %	99,92 %	99,93 %	99,92 %
kutistumis%	0,07 %	0,06 %	0,07 %	0,06 %	0,07 %	0,07 %	0,07 %	0,08 %	0,07 %	0,08 %
kutistuma (mm)	0,09	0,08	0,09	0,08	0,10	0,10	0,09	0,10	0,09	0,10
3. mittaus/oikea pituus (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
lsku 1	131,39	131,36	131,14	131,20	131,39	131,37	131,33	131,17	131,21	131,34
lsku 2	131,39	131,35	131,21	131,27	131,39	131,36	131,33	131,18	131,24	131,35
lsku 3	131,37	131,36	131,20	131,23	131,40	131,36	131,32	131,17	131,19	131,36
lsku 4	131,38	131,33	131,21	131,23	131,41	131,35	131,33	131,18	131,23	131,35
lsku 5	131,37	131,34	131,21	131,24	131,40	131,35	131,32	131,21	131,19	131,35
lsku 6	131,39	131,36	131,21	131,23	131,39	131,37	131,33	131,20	131,22	131,36
lsku 7	131,38	131,34	131,21	131,24	131,38	131,35	131,32	131,16	131,21	131,34
lsku 8	131,39	131,35	131,16	131,21	131,40	131,34	131,33	131,20	131,19	131,37
lsku 9	131,34	131,31	131,18	131,26	131,40	131,36	131,32	131,18	131,23	131,36
lsku 10	131,37	131,32	131,19	131,19	131,40	131,34	131,31	131,20	131,23	131,37
ka (mm)	131,38	131,34	131,19	131,23	131,39	131,35	131,32	131,19	131,21	131,35
%	99,90 %	99,91 %	99,91 %	99,91 %	99,89 %	99,89 %	99,90 %	99,89 %	99,90 %	99,89 %
kutistumis%	0,10 %	0,09 %	0,09 %	0,09 %	0,11 %	0,11 %	0,10 %	0,11 %	0,10 %	0,11 %
kutistuma (mm)	0,13	0,12	0,12	0,12	0,14	0,14	0,13	0,15	0,13	0,15

4. mittaus/oikea pituus (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	131,34	131,31	131,11	131,16	131,35	131,31	131,28	131,13	131,17	131,28
Isku 2	131,34	131,30	131,17	131,22	131,34	131,32	131,29	131,14	131,19	131,29
Isku 3	131,34	131,31	131,16	131,19	131,35	131,31	131,28	131,13	131,15	131,32
Isku 4	131,33	131,29	131,17	131,19	131,36	131,30	131,29	131,14	131,19	131,30
Isku 5	131,33	131,30	131,17	131,20	131,35	131,31	131,28	131,16	131,14	131,31
Isku 6	131,35	131,32	131,18	131,19	131,34	131,32	131,29	131,15	131,18	131,32
Isku 7	131,33	131,29	131,16	131,19	131,33	131,31	131,28	131,11	131,17	131,29
Isku 8	131,35	131,31	131,13	131,19	131,35	131,30	131,28	131,15	131,14	131,32
Isku 9	131,30	131,27	131,14	131,22	131,35	131,31	131,29	131,14	131,19	131,32
Isku 10	131,33	131,28	131,16	131,15	131,35	131,30	131,27	131,16	131,18	131,32
ka (mm)	131,33	131,30	131,15	131,19	131,35	131,31	131,28	131,14	131,17	131,31
%	99,87 %	99,88 %	99,88 %	99,88 %	99,85 %	99,86 %	99,87 %	99,85 %	99,87 %	99,85 %
kutistumis%	0,13 %	0,12 %	0,12 %	0,12 %	0,15 %	0,14 %	0,13 %	0,15 %	0,13 %	0,15 %
kutistuma (mm)	0,17	0,16	0,16	0,16	0,19	0,18	0,17	0,20	0,18	0,19
5. mittaus/oikea pituus (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	131,32	131,29	131,11	131,15	131,32	131,29	131,27	131,10	131,14	131,27
Isku 2	131,32	131,28	131,15	131,21	131,32	131,29	131,27	131,12	131,17	131,27
Isku 3	131,31	131,28	131,14	131,17	131,32	131,28	131,27	131,10	131,13	131,30
Isku 4	131,31	131,27	131,15	131,17	131,33	131,27	131,27	131,11	131,16	131,29
Isku 5	131,31	131,28	131,14	131,18	131,33	131,29	131,27	131,14	131,12	131,28
Isku 6	131,32	131,30	131,16	131,17	131,32	131,29	131,27	131,13	131,16	131,29
Isku 7	131,31	131,28	131,15	131,18	131,31	131,29	131,25	131,08	131,14	131,27
Isku 8	131,33	131,29	131,11	131,17	131,32	131,28	131,26	131,12	131,13	131,29
Isku 9	131,28	131,25	131,12	131,19	131,32	131,29	131,27	131,11	131,16	131,29
Isku 10	131,30	131,26	131,14	131,14	131,33	131,26	131,24	131,13	131,16	131,29
ka (mm)	131,31	131,28	131,14	131,17	131,32	131,28	131,26	131,11	131,15	131,28
%	99,85 %	99,86 %	99,87 %	99,86 %	99,83 %	99,84 %	99,86 %	99,83 %	99,85 %	99,84 %
kutistumis%	0,15 %	0,14 %	0,13 %	0,14 %	0,17 %	0,16 %	0,14 %	0,17 %	0,15 %	0,16 %
kutistuma (mm)	0,19	0,18	0,18	0,18	0,22	0,21	0,19	0,22	0,20	0,22
6. mittaus/oikea pituus (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	131,29	131,27	131,06	131,12	131,29	131,25	131,23	131,06	131,11	131,24
Isku 2	131,29	131,25	131,12	131,17	131,29	131,26	131,23	131,08	131,14	131,24
Isku 3	131,28	131,25	131,11	131,14	131,29	131,25	131,24	131,07	131,10	131,26
Isku 4	131,28	131,23	131,12	131,13	131,29	131,24	131,23	131,08	131,13	131,25
Isku 5	131,28	131,25	131,11	131,15	131,30	131,25	131,23	131,10	131,09	131,24
Isku 6	131,29	131,27	131,13	131,14	131,29	131,26	131,24	131,10	131,13	131,26
Isku 7	131,28	131,25	131,12	131,15	131,27	131,25	131,22	131,05	131,10	131,24
Isku 8	131,29	131,25	131,08	131,13	131,29	131,24	131,23	131,08	131,10	131,26
Isku 9	131,24	131,22	131,09	131,18	131,30	131,25	131,24	131,07	131,13	131,26
Isku 10	131,27	131,22	131,11	131,11	131,30	131,23	131,22	131,10	131,12	131,26
ka (mm)	131,28	131,25	131,11	131,14	131,29	131,25	131,23	131,08	131,12	131,25
%	99,83 %	99,84 %	99,84 %	99,84 %	99,81 %	99,81 %	99,83 %	99,80 %	99,82 %	99,81 %
kutistumis%	0,17 %	0,16 %	0,16 %	0,16 %	0,19 %	0,19 %	0,17 %	0,20 %	0,18 %	0,19 %
kutistuma (mm)	0,23	0,21	0,21	0,21	0,25	0,25	0,22	0,26	0,23	0,25

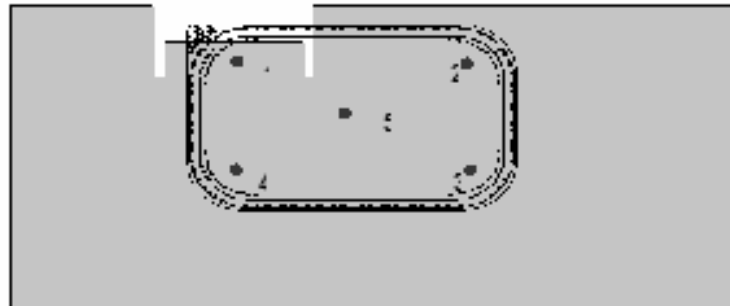
1. mitaus / ristimitta vasemmasta yläkulmasta oikealle alas (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	126,07	125,94	125,99	125,91	126,14	126,17	126,06	126,03	126,16	126,14
Isku 2	126,07	125,92	126,01	125,96	126,14	126,17	126,06	126,04	126,20	126,13
Isku 3	126,04	125,93	125,99	125,92	126,14	126,17	126,06	126,04	126,16	126,14
Isku 4	126,07	125,90	126,00	125,90	126,13	126,15	126,05	126,01	126,18	126,13
Isku 5	126,06	125,92	126,00	125,93	126,13	126,16	126,06	126,05	126,17	126,13
Isku 6	126,07	125,92	126,02	125,93	126,12	126,14	126,05	126,04	126,17	126,12
Isku 7	126,05	125,91	126,01	125,94	126,11	126,15	126,05	126,01	126,16	126,13
Isku 8	126,05	125,93	126,00	125,92	126,12	126,14	126,06	126,03	126,15	126,12
Isku 9	126,02	125,89	125,99	125,95	126,13	126,15	126,05	126,02	126,17	126,12
Isku 10	126,05	125,90	126,00	125,89	126,13	126,14	126,04	126,04	126,18	126,13
ka (mm)	126,06	125,92	126,00	125,93	126,13	126,15	126,06	126,03	126,17	126,13
%	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
kutistumis%	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
kutistuma (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2. mitaus / ristimitta vasemmasta yläkulmasta oikealle alas (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	126,01	125,88	125,92	125,85	126,07	126,11	126,01	125,96	126,09	126,08
Isku 2	126,01	125,87	125,94	125,90	126,08	126,09	126,00	125,98	126,14	126,06
Isku 3	125,99	125,87	125,94	125,86	126,08	126,10	125,98	125,96	126,10	126,08
Isku 4	126,01	125,86	125,96	125,86	126,07	126,10	126,01	125,95	126,13	126,07
Isku 5	126,01	125,88	125,96	125,89	126,07	126,10	126,02	126,00	126,11	126,07
Isku 6	126,01	125,88	125,96	125,89	126,06	126,10	126,01	125,98	126,12	126,07
Isku 7	125,99	125,86	125,97	125,90	126,06	126,10	126,01	125,95	126,12	126,07
Isku 8	125,99	125,89	125,95	125,87	126,07	126,09	126,03	125,97	126,10	126,07
Isku 9	125,97	125,85	125,94	125,89	126,08	126,09	125,99	125,97	126,13	126,07
Isku 10	126,00	125,86	125,94	125,85	126,09	126,09	126,00	125,99	126,14	126,08
ka (mm)	126,00	125,87	125,95	125,87	126,07	126,10	126,00	125,97	126,12	126,07
%	99,95 %	99,96 %	99,96 %	99,96 %	99,95 %	99,95 %	99,96 %	99,95 %	99,96 %	99,95 %
kutistumis%	0,05 %	0,04 %	0,04 %	0,04 %	0,05 %	0,05 %	0,04 %	0,05 %	0,04 %	0,05 %
kutistuma (mm)	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,06
3. mitaus / ristimitta vasemmasta yläkulmasta oikealle alas (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	125,98	125,86	125,89	125,82	126,04	126,08	125,98	125,93	126,08	126,05
Isku 2	125,98	125,85	125,95	125,89	126,04	126,08	125,98	125,95	126,11	126,03
Isku 3	125,97	125,87	125,94	125,86	126,05	126,07	125,97	125,94	126,07	126,05
Isku 4	125,98	125,84	125,94	125,86	126,05	126,07	125,98	125,93	126,10	126,05
Isku 5	125,98	125,85	125,93	125,87	126,05	126,05	125,99	125,96	126,09	126,04
Isku 6	125,98	125,86	125,93	125,86	126,04	126,07	125,98	125,95	126,09	126,05
Isku 7	125,97	125,84	125,94	125,88	126,03	126,07	125,98	125,92	126,09	126,05
Isku 8	125,97	125,86	125,91	125,83	126,04	126,06	126,01	125,95	126,07	126,04
Isku 9	125,95	125,83	125,92	125,88	126,05	126,07	125,97	125,94	126,10	126,05
Isku 10	125,98	125,84	125,93	125,83	126,05	126,06	125,97	125,96	126,11	126,05
ka (mm)	125,97	125,85	125,93	125,86	126,04	126,07	125,98	125,94	126,09	126,04
%	99,94 %	99,95 %	99,94 %	99,95 %	99,93 %	99,93 %	99,94 %	99,93 %	99,94 %	99,93 %
kutistumis%	0,06 %	0,05 %	0,06 %	0,05 %	0,07 %	0,07 %	0,06 %	0,07 %	0,06 %	0,07 %
kutistuma (mm)	0,08	0,07	0,07	0,07	0,09	0,09	0,07	0,09	0,08	0,09

4. mitaus / ristimitta vasemmasta yläkulmasta oikealle alas (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
lsku 1	125,95	125,83	125,87	125,80	126,01	126,06	125,96	125,90	126,05	126,02
lsku 2	125,95	125,82	125,92	125,87	126,01	126,05	125,96	125,92	126,09	126,01
lsku 3	125,94	125,83	125,90	125,82	126,02	126,05	125,95	125,91	126,05	126,02
lsku 4	125,96	125,81	125,92	125,82	126,02	126,05	125,96	125,90	126,07	126,02
lsku 5	125,95	125,83	125,91	125,85	126,02	126,05	125,97	125,94	126,06	126,02
lsku 6	125,96	125,84	125,92	125,84	126,01	126,05	125,96	125,92	126,07	126,02
lsku 7	125,95	125,82	125,91	125,86	126,00	126,05	125,96	125,90	126,07	126,02
lsku 8	125,95	125,84	125,90	125,83	126,01	126,04	125,96	125,92	126,04	126,01
lsku 9	125,93	125,80	125,89	125,86	126,02	126,04	125,96	125,91	126,08	126,02
lsku 10	125,95	125,82	125,91	125,79	126,03	126,04	125,95	125,93	126,08	126,03
ka (mm)	125,95	125,82	125,91	125,83	126,02	126,05	125,96	125,91	126,06	126,02
%	99,92 %	99,93 %	99,92 %	99,93 %	99,91 %	99,92 %	99,92 %	99,91 %	99,92 %	99,91 %
kutistumis%	0,08 %	0,07 %	0,08 %	0,07 %	0,09 %	0,08 %	0,08 %	0,09 %	0,08 %	0,09 %
kutistuma (mm)	0,11	0,09	0,10	0,09	0,11	0,11	0,10	0,12	0,10	0,11
5. mitaus / ristimitta vasemmasta yläkulmasta oikealle alas (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
lsku 1	125,93	125,81	125,87	125,80	125,99	126,04	125,94	125,89	126,03	126,01
lsku 2	125,94	125,81	125,91	125,85	126,00	126,04	125,95	125,90	126,07	125,99
lsku 3	125,93	125,81	125,90	125,81	126,00	126,03	125,95	125,90	126,03	126,00
lsku 4	125,94	125,80	125,91	125,82	126,00	126,03	125,95	125,88	126,05	126,00
lsku 5	125,94	125,82	125,90	125,83	126,00	126,03	125,96	125,92	126,04	126,00
lsku 6	125,94	125,82	125,90	125,82	126,00	126,02	125,95	125,91	126,05	126,00
lsku 7	125,93	125,80	125,91	125,85	125,99	126,03	125,95	125,88	126,05	126,00
lsku 8	125,93	125,83	125,89	125,81	126,00	126,02	125,95	125,90	126,03	125,99
lsku 9	125,91	125,79	125,90	125,85	126,00	126,03	125,95	125,90	126,06	126,00
lsku 10	125,93	125,80	125,90	125,81	126,01	126,02	125,94	125,91	126,07	126,01
ka (mm)	125,93	125,81	125,90	125,82	126,00	126,03	125,95	125,90	126,05	126,00
%	99,90 %	99,92 %	99,92 %	99,92 %	99,90 %	99,90 %	99,91 %	99,89 %	99,90 %	99,90 %
kutistumis%	0,10 %	0,08 %	0,08 %	0,08 %	0,10 %	0,10 %	0,09 %	0,11 %	0,10 %	0,10 %
kutistuma (mm)	0,12	0,11	0,10	0,10	0,13	0,13	0,11	0,13	0,12	0,13
6. mitaus / ristimitta vasemmasta yläkulmasta oikealle alas (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
lsku 1	125,92	125,80	125,84	125,79	125,97	126,01	125,92	125,86	126,01	125,98
lsku 2	125,92	125,79	125,90	125,84	125,98	126,02	125,93	125,88	126,05	125,97
lsku 3	125,91	125,79	125,87	125,80	125,98	126,01	125,93	125,87	126,02	125,99
lsku 4	125,92	125,78	125,89	125,80	125,98	126,01	125,93	125,86	126,04	125,98
lsku 5	125,92	125,80	125,88	125,81	125,99	126,01	125,94	125,90	126,03	125,98
lsku 6	125,92	125,80	125,89	125,81	125,98	126,01	125,93	125,89	126,04	125,98
lsku 7	125,91	125,78	125,89	125,82	125,97	126,00	125,93	125,85	126,03	125,98
lsku 8	125,91	125,81	125,88	125,81	125,98	126,00	125,93	125,88	126,02	125,97
lsku 9	125,89	125,77	125,86	125,82	125,99	126,01	125,93	125,87	126,04	125,98
lsku 10	125,91	125,78	125,88	125,77	126,00	126,00	125,92	125,89	126,05	125,99
ka (mm)	125,91	125,79	125,88	125,81	125,98	126,01	125,93	125,88	126,03	125,98
%	99,89 %	99,90 %	99,90 %	99,91 %	99,88 %	99,88 %	99,90 %	99,88 %	99,89 %	99,88 %
kutistumis%	0,11 %	0,10 %	0,10 %	0,09 %	0,12 %	0,12 %	0,10 %	0,12 %	0,11 %	0,12 %
kutistuma (mm)	0,14	0,13	0,13	0,12	0,15	0,15	0,13	0,16	0,14	0,15

1. mitaus / ristimitta oikeasta yläkulmasta vasemmalle alas (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	126,13	125,93	126,06	125,93	126,16	126,21	126,10	126,05	126,17	126,15
Isku 2	126,11	125,94	126,04	125,94	126,16	126,21	126,09	126,07	126,18	126,16
Isku 3	126,10	125,91	126,06	125,92	126,17	126,20	126,09	126,05	126,17	126,17
Isku 4	126,10	125,93	126,04	125,94	126,18	126,20	126,08	126,06	126,17	126,15
Isku 5	126,09	125,90	126,03	125,93	126,17	126,20	126,08	126,03	126,15	126,15
Isku 6	126,10	125,91	126,04	125,92	126,15	126,20	126,10	126,04	126,17	126,16
Isku 7	126,08	125,90	126,02	125,91	126,16	126,19	126,07	126,05	126,16	126,15
Isku 8	126,08	125,88	125,99	125,93	126,16	126,18	126,08	126,03	126,15	126,18
Isku 9	126,08	125,89	126,02	125,93	126,16	126,19	126,08	126,02	126,16	126,16
Isku 10	126,06	125,91	126,04	125,90	126,17	126,18	126,07	126,04	126,17	126,17
ka (mm)	126,09	125,91	126,03	125,93	126,16	126,20	126,08	126,04	126,16	126,16
%	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
kutistumis%	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
kutistuma (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2. mitaus / ristimitta oikeasta yläkulmasta vasemmalle alas (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	126,06	125,88	126,00	125,87	126,10	126,14	126,04	125,96	126,11	126,08
Isku 2	126,05	125,89	126,00	125,90	126,10	126,15	126,05	126,00	126,11	126,10
Isku 3	126,04	125,87	126,01	125,88	126,11	126,14	126,06	125,99	126,11	126,11
Isku 4	126,04	125,88	125,98	125,89	126,11	126,14	126,04	126,00	126,11	126,10
Isku 5	126,03	125,85	125,98	125,88	126,11	126,14	126,03	125,97	126,10	126,10
Isku 6	126,05	125,86	126,00	125,88	126,10	126,14	126,06	125,98	126,12	126,10
Isku 7	126,03	125,86	125,98	125,87	126,10	126,14	126,03	125,99	126,10	126,09
Isku 8	126,03	125,84	125,95	125,89	126,11	126,13	126,03	125,97	126,09	126,13
Isku 9	126,03	125,85	125,98	125,90	126,11	126,13	126,04	125,96	126,10	126,11
Isku 10	126,01	125,87	126,00	125,87	126,11	126,13	126,03	125,98	126,12	126,12
ka (mm)	126,04	125,86	125,99	125,88	126,11	126,14	126,04	125,98	126,11	126,10
%	99,96 %	99,96 %	99,96 %	99,97 %	99,95 %	99,96 %	99,96 %	99,95 %	99,95 %	99,95 %
kutistumis%	0,04 %	0,04 %	0,04 %	0,03 %	0,05 %	0,04 %	0,04 %	0,05 %	0,05 %	0,05 %
kutistuma (mm)	0,06	0,05	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,06	0,06	0,06
3. mitaus / ristimitta oikeasta yläkulmasta vasemmalle alas (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	126,03	125,85	125,97	125,85	126,07	126,11	126,02	125,93	126,07	126,06
Isku 2	126,03	125,86	125,95	125,85	126,07	126,11	126,02	125,96	126,08	126,07
Isku 3	126,01	125,83	125,97	125,85	126,08	126,11	126,02	125,95	126,08	126,08
Isku 4	126,02	125,85	125,95	125,85	126,09	126,12	126,02	125,97	126,09	126,07
Isku 5	126,01	125,83	125,96	125,86	126,08	126,12	126,01	125,94	126,07	126,07
Isku 6	126,03	125,84	125,98	125,85	126,07	126,11	126,04	125,95	126,09	126,07
Isku 7	126,02	125,84	125,96	125,85	126,08	126,11	126,01	125,96	126,07	126,06
Isku 8	126,01	125,82	125,94	125,87	126,08	126,11	126,00	125,95	126,07	126,10
Isku 9	126,00	125,83	125,96	125,86	126,08	126,11	126,02	125,93	126,08	126,08
Isku 10	125,99	125,85	125,98	125,84	126,09	126,10	126,01	125,95	126,09	126,09
ka (mm)	126,01	125,84	125,96	125,85	126,08	126,11	126,02	125,95	126,08	126,08
%	99,94 %	99,94 %	99,94 %	99,94 %	99,93 %	99,93 %	99,95 %	99,93 %	99,93 %	99,93 %
kutistumis%	0,06 %	0,06 %	0,06 %	0,06 %	0,07 %	0,07 %	0,05 %	0,07 %	0,07 %	0,07 %
kutistuma (mm)	0,08	0,07	0,07	0,07	0,09	0,08	0,07	0,09	0,09	0,09

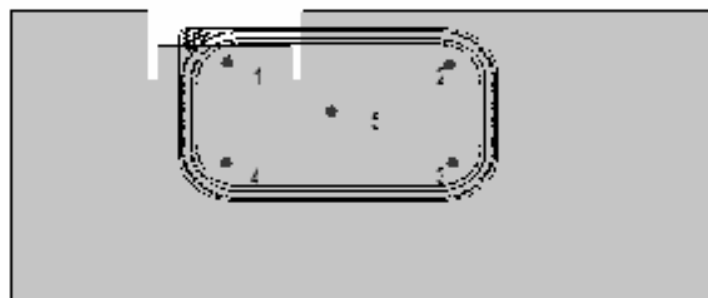
4. mitaus / ristimitta oikeasta yläkulmasta vasemmalle alas (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	126,00	125,82	125,95	125,82	126,04	126,07	126,00	125,91	126,04	126,02
Isku 2	125,99	125,84	125,93	125,83	126,04	126,09	126,00	125,94	126,06	126,04
Isku 3	125,99	125,82	125,96	125,83	126,05	126,09	126,00	125,92	126,05	126,06
Isku 4	125,99	125,83	125,93	125,84	126,06	126,07	125,99	125,94	126,06	126,04
Isku 5	125,98	125,80	125,93	125,82	126,06	126,08	125,98	125,91	126,04	126,05
Isku 6	126,00	125,81	125,95	125,83	126,04	126,08	126,01	125,93	126,06	126,05
Isku 7	125,98	125,81	125,94	125,81	126,05	126,09	125,99	125,93	126,05	126,03
Isku 8	125,99	125,79	125,91	125,84	126,06	126,07	126,00	125,91	126,04	126,08
Isku 9	125,97	125,81	125,94	125,84	126,05	126,08	125,99	125,90	126,05	126,05
Isku 10	125,96	125,82	125,95	125,83	126,06	126,08	125,98	125,93	126,06	126,06
ka (mm)	125,99	125,81	125,94	125,83	126,05	126,08	125,99	125,92	126,05	126,05
%	99,92 %	99,92 %	99,92 %	99,92 %	99,91 %	99,91 %	99,93 %	99,90 %	99,91 %	99,91 %
kutistumis%	0,08 %	0,08 %	0,08 %	0,08 %	0,09 %	0,09 %	0,07 %	0,10 %	0,09 %	0,09 %
kutistuma (mm)	0,11	0,10	0,10	0,10	0,11	0,12	0,09	0,12	0,11	0,11
5. mitaus / ristimitta oikeasta yläkulmasta vasemmalle alas (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	125,99	125,81	125,94	125,81	126,02	126,06	125,99	125,89	126,03	126,01
Isku 2	125,98	125,82	125,91	125,82	126,03	126,07	125,98	125,92	126,04	126,03
Isku 3	125,97	125,80	125,94	125,81	126,04	126,07	125,98	125,90	126,03	126,04
Isku 4	125,98	125,81	125,91	125,81	126,04	126,07	125,98	125,93	126,04	126,03
Isku 5	125,97	125,79	125,92	125,82	126,04	126,07	125,97	125,90	126,03	126,03
Isku 6	125,98	125,80	125,94	125,83	126,03	126,07	126,00	125,91	126,05	126,04
Isku 7	125,97	125,80	125,92	125,80	126,03	126,07	125,97	125,91	126,03	126,02
Isku 8	125,97	125,78	125,89	125,82	126,04	126,06	125,98	125,90	126,02	126,06
Isku 9	125,96	125,79	125,90	125,81	126,03	126,06	125,97	125,89	126,03	126,04
Isku 10	125,95	125,81	125,93	125,79	126,04	126,06	125,97	125,91	126,04	126,05
ka (mm)	125,97	125,80	125,92	125,81	126,03	126,07	125,98	125,90	126,03	126,03
%	99,90 %	99,91 %	99,91 %	99,91 %	99,90 %	99,90 %	99,92 %	99,89 %	99,90 %	99,90 %
kutistumis%	0,10 %	0,09 %	0,09 %	0,09 %	0,10 %	0,10 %	0,08 %	0,11 %	0,10 %	0,10 %
kutistuma (mm)	0,12	0,11	0,11	0,11	0,13	0,13	0,11	0,14	0,13	0,13
6. mitaus / ristimitta oikeasta yläkulmasta vasemmalle alas (mm)										
	pesä 1	pesä 2	pesä 3	pesä 4	pesä 5	pesä 6	pesä 7	pesä 8	pesä 9	pesä 10
Isku 1	125,97	125,79	125,92	125,78	126,00	126,04	125,96	125,87	126,00	126,00
Isku 2	125,96	125,80	125,89	125,79	126,01	126,05	125,96	125,90	126,02	126,01
Isku 3	125,95	125,79	125,93	125,79	126,01	126,05	125,96	125,88	126,01	126,02
Isku 4	125,96	125,79	125,89	125,79	126,02	126,04	125,96	125,91	126,02	126,01
Isku 5	125,95	125,76	125,90	125,80	126,02	126,05	125,94	125,87	126,00	126,01
Isku 6	125,96	125,78	125,92	125,79	126,01	126,05	125,98	125,89	126,03	126,01
Isku 7	125,95	125,78	125,90	125,79	126,01	126,05	125,95	125,89	126,01	126,00
Isku 8	125,95	125,76	125,87	125,79	126,02	126,04	125,97	125,88	126,01	126,04
Isku 9	125,94	125,77	125,90	125,81	126,01	126,04	125,96	125,86	126,01	126,01
Isku 10	125,93	125,79	125,92	125,79	126,02	126,04	125,95	125,89	126,02	126,03
ka (mm)	125,95	125,78	125,90	125,79	126,01	126,04	125,96	125,88	126,01	126,01
%	99,89 %	99,90 %	99,90 %	99,89 %	99,88 %	99,88 %	99,90 %	99,87 %	99,88 %	99,88 %
kutistumis%	0,11 %	0,10 %	0,10 %	0,11 %	0,12 %	0,12 %	0,10 %	0,13 %	0,12 %	0,12 %
kutistuma (mm)	0,14	0,13	0,13	0,13	0,15	0,15	0,12	0,16	0,15	0,15

LIITE 2: KANSIEN SEINÄMÄVAHVUUDET JA MASSAT



Isku 1						
Pesä	Paino g	Vahvuudet, mm				
		1	2	3	4	5
1	5,32	0,35	0,35	0,36	0,36	0,40
2	5,45	0,37	0,38	0,39	0,36	0,42
3	5,52	0,38	0,40	0,37	0,37	0,42
4	5,61	0,36	0,39	0,41	0,42	0,43
5	5,49	0,37	0,36	0,36	0,38	0,39
6	5,51	0,35	0,34	0,35	0,35	0,40
7	5,64	0,36	0,36	0,39	0,39	0,42
8	5,67	0,37	0,38	0,39	0,39	0,42
9	5,73	0,35	0,39	0,40	0,41	0,44
10	5,63	0,37	0,38	0,38	0,38	0,41
min	5,32	0,35	0,34	0,35	0,35	0,39
max	5,73	0,38	0,40	0,41	0,42	0,44
Ka	5,56	0,36	0,37	0,38	0,38	0,42

Isku 4						
Pesä	Paino g	Vahvuudet, mm				
		1	2	3	4	5
1	5,36	0,36	0,34	0,38	0,38	0,40
2	5,48	0,38	0,39	0,39	0,40	0,42
3	5,52	0,37	0,37	0,39	0,37	0,42
4	5,59	0,38	0,39	0,38	0,40	0,43
5	5,44	0,35	0,35	0,35	0,35	0,39
6	5,51	0,35	0,36	0,35	0,35	0,42
7	5,63	0,36	0,36	0,38	0,39	0,44
8	5,64	0,35	0,34	0,36	0,36	0,42
9	5,73	0,37	0,36	0,41	0,38	0,45
10	5,58	0,35	0,36	0,37	0,36	0,41
min	5,36	0,35	0,34	0,35	0,35	0,39
max	5,73	0,38	0,39	0,41	0,40	0,45
Ka	5,55	0,36	0,36	0,38	0,37	0,42



Isku 7						
Pesä	Paino g	Vahvuudet, mm				
		1	2	3	4	5
1	5,38	0,36	0,34	0,36	0,39	0,40
2	5,49	0,37	0,37	0,40	0,39	0,42
3	5,54	0,35	0,38	0,38	0,37	0,43
4	5,61	0,38	0,38	0,40	0,40	0,42
5	5,45	0,36	0,37	0,35	0,35	0,38
6	5,51	0,33	0,37	0,37	0,39	0,41
7	5,62	0,37	0,39	0,40	0,40	0,44
8	5,64	0,38	0,38	0,36	0,37	0,42
9	5,72	0,37	0,39	0,39	0,40	0,43
10	5,57	0,37	0,39	0,39	0,37	0,40
min	5,38	0,33	0,34	0,35	0,35	0,38
max	5,72	0,38	0,39	0,40	0,40	0,44
Ka	5,55	0,37	0,38	0,38	0,38	0,42

Isku 10						
Pesä	Paino g	Vahvuudet, mm				
		1	2	3	4	5
1	5,42	0,39	0,38	0,35	0,38	0,42
2	5,47	0,36	0,34	0,40	0,39	0,43
3	5,54	0,38	0,38	0,38	0,39	0,42
4	5,61	0,37	0,38	0,40	0,40	0,43
5	5,43	0,38	0,37	0,36	0,38	0,39
6	5,52	0,36	0,38	0,37	0,39	0,42
7	5,62	0,37	0,38	0,41	0,42	0,44
8	5,63	0,37	0,39	0,38	0,39	0,42
9	5,69	0,35	0,35	0,40	0,40	0,44
10	5,56	0,36	0,37	0,36	0,38	0,42
min	5,42	0,35	0,34	0,35	0,38	0,39
max	5,69	0,39	0,39	0,41	0,42	0,44
Ka	5,55	0,37	0,37	0,38	0,39	0,42